



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Diseño, simulación y ensayo de una viga de
vidrio para su utilización como elemento
estructural

Design, simulation and experimental test of a glass
beam to use it as structural element

Autor

Borja Navarro Ausere

Directores

María José Gómez Benito

José Manuel Marco Hernández

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Año 2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. BORJA NAVARRO AUSERE

con nº de DNI 73022186-S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Máster _____, (Título del Trabajo)

Diseño, simulación y ensayo de una viga de vidrio para su utilización como
elemento estructural

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 20 de noviembre de 2016

Fdo: BORJA NAVARRO AUSERE

Agradecimientos

A María José Gómez y a José Manuel Marco que en todo momento me han prestado su ayuda, permitiéndome avanzar satisfactoriamente en todas las fases del proyecto, así como me han servido de motivación para su consecución.

De igual forma a Sara Márquez por su apoyo y ayuda durante todo el Máster.

Diseño, simulación y ensayo de una viga de vidrio para su utilización como elemento estructural

RESUMEN

Uno de los materiales más utilizados como elemento estructural para la fabricación de vigas es el acero. Sin embargo, la innovación en materiales ha permitido la utilización de otro tipo de materiales, como es el caso del vidrio.

Con este trabajo se pretende investigar, utilizando modelos de simulación basados en elementos finitos, la viabilidad de fabricar secciones de vigas compuestas por un material tan frágil como es el vidrio, unidas mediante adhesivos especiales; centrando el proyecto en el diseño de dicha unión.

Para ello se ha llevado a cabo la simulación de una serie de vigas, mediante el programa de simulación por elementos finitos Abaqus/CAE 6.12, de tal forma que se ha desarrollado un modelo paramétrico que permite la simulación de cualquier casuística de ensayo de flexión a cuatro puntos de este tipo de vigas.

Para la simulación de estos ensayos, se ha partido del caso más sencillo, es decir, de una viga maciza, añadiendo complejidad al modelo hasta la consecución de la unión de una serie de láminas de vidrio que conformarán la propia viga y finalmente añadiendo en las simulaciones un modelo de daño al adhesivo utilizado.

Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de utilizar este tipo de secciones de vigas unidas mediante un adhesivo especial imperceptible a la vista, teniendo en cuenta las limitaciones, en términos de carga soportada, que conlleva el uso de vigas de vidrio.

Por último, se ha llevado a cabo la fabricación de las secciones de viga con el diseño óptimo de la unión, para finalmente ensayarla y comparar los resultados con los obtenidos mediante las simulaciones. Obteniendo una validación positiva de la simulación, debido a la concordancia entre los resultados experimentales y los computacionales.

Índice

1	Introducción.....	3
1.1	El vidrio y sus aplicaciones.....	3
1.2	Estudios previos.....	3
1.3	Construcciones actuales	3
1.4	Descripción del problema	6
2	Objetivo	6
3	Métodos y cálculos.....	7
3.1	Modelo	7
3.1.1	Materiales	7
3.1.2	Geometría	10
3.1.3	Condiciones de contorno.....	11
3.1.4	Contacto.....	12
3.1.5	Mallado	12
3.1.6	Simulación	13
4	Resultados	13
4.1	Comparación simulaciones de distintas composiciones de vidrio	13
4.2	Estudio del decalaje óptimo.....	15
4.3	Análisis del modelo de daño del adhesivo	22
4.4	Fabricación de la viga	23
4.4.1	Proceso de corte	23
4.4.2	Proceso de pulido	23
4.4.3	Proceso de laminado en bolsa de vacío	24
4.4.4	Proceso de autoclave.....	25
4.4.5	Resultado final	26
4.4.6	Unión con adhesivo.....	27
4.5	Ensayos y comparación con las simulaciones.....	27
5	Conclusiones y discusión	31
6	Bibliografía	32
7	Anexos	1
7.1	Ficha técnica del SentryGlas®	1
7.2	Ficha técnica del adhesivo Araldite 2028-01	2
7.3	Densidad de energía del modelo neo-Hookeano.....	3

7.4 Código del programa parametrizado 4

1 Introducción

Uno de los materiales más utilizados como elemento estructural es el acero. Sin embargo, la tendencia actual es la utilización de nuevos materiales, entre ellos se encuentra el vidrio, debido a sus especiales propiedades estéticas, al poder dotar de transparencia a elementos tradicionalmente opacos, como es el caso de las vigas y pilares. No obstante es necesario abordar varios problemas que conlleva su utilización, como por ejemplo su fabricación en grandes dimensiones.

1.1 El vidrio y sus aplicaciones

Actualmente el vidrio tiene una gran cantidad de aplicaciones, su utilización más común en el sector arquitectónico es como cerramientos, añadiéndole capas, serigrafías o láminas de colores para modificar sus características tanto técnicas, como visuales. También es utilizado como elemento de protección, introduciendo láminas de polímero impidiendo que éste pueda ser atravesado.

1.2 Estudios previos

Existen estudios previos en los que se han analizado ensayos sobre distintas tipologías de vigas fabricadas total o parcialmente con vidrio. En *Louter et al.*, [6], se analiza la unión de láminas de vidrio superpuestas mediante un adhesivo para implementar el diseño de una viga de 18m. En este estudio se concluye que el vidrio reforzado con adhesivo ofrece una seguridad adecuada para componentes de vidrio estructural de gran envergadura, por otro lado se ha de tener en cuenta el pandeo lateral, ya que puede provocar un crecimiento excesivo de grieta horizontalmente. En *Louter et al.*, [7], se realiza un ensayo de flexión a cuatro puntos a distintas temperaturas (-20°C, 23°C y 60°C) en una viga formada por láminas de vidrio unidas con SentryGlas® (lámina polimérica utilizada para adherir varias hojas de vidrio) y reforzada con metal, concluyendo que la utilización de SentryGlas® como elemento de unión entre las distintas láminas de vidrio es un concepto factible y prometedor. En *Núñez et al.*, [2], se investiga y analiza la utilización del vidrio como elemento estructural, sometiendo una viga pre-comprimida a flexión. Se concluye que a pesar de la fragilidad del vidrio, es posible realizar simulaciones fiables mediante elementos finitos. Por otro lado, la utilización de vigas pre-comprimidas reduce el esfuerzo a tracción en la zona inferior de la viga

1.3 Construcciones actuales

Entre algunos de los edificios más representativos en los que han sido utilizados distintas tipologías de vigas compuestas en su mayor parte por vidrio, se encuentra la Alianza Bancaria Irlandesa (AIB), diseñada por el grupo de arquitectos RKD y construida en el 2008, donde destaca la cubierta de acero y vidrio (*Figura 1*).



Figura 1: Allied Irish Banks, Bank centre, Dublin.

También por su techo construido mediante vigas de vidrio, se caracteriza el edificio Wolfson de la universidad de Glasgow (*Figura 2*).

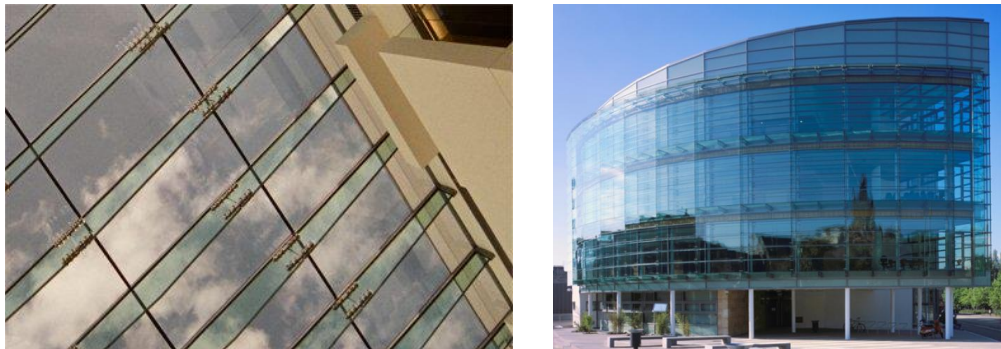


Figura 2: Wolfson Medical School Building 2002, Glasgow.

Un edificio que destaca por sus puentes de vidrio unidos mediante tornillos es el centro comercial Eaton de Toronto, localizado en el centro financiero de la ciudad (*Figura 3*).



Figura 3: Eaton Center, Calgary (MMC International Architects) 2010, Toronto.

Otro ejemplo de puente fabricado con vidrio sería el de unas oficinas de Rotterdam (*Figura 4*), cuya dimensión es de 3.5 m, y está compuesto por 3 láminas de vidrio de 10 mm diseñadas con una forma parabólica.



Figura 4: Puente de vidrio, Rotterdam 1994.

Debido a su construcción enteramente de vidrio, destaca la tienda de Apple en la quinta avenida de New York, diseñada por el arquitecto Bohlin Cywinski junto a la ingeniería Eckersley&O'Callaghan (*Figura 5*).



Figura 5: Tienda Apple, New York 2006.

1.4 Descripción del problema

Las uniones más comunes para la utilización del vidrio como elemento estructural son tornillos similares al de la *Figura 6*.

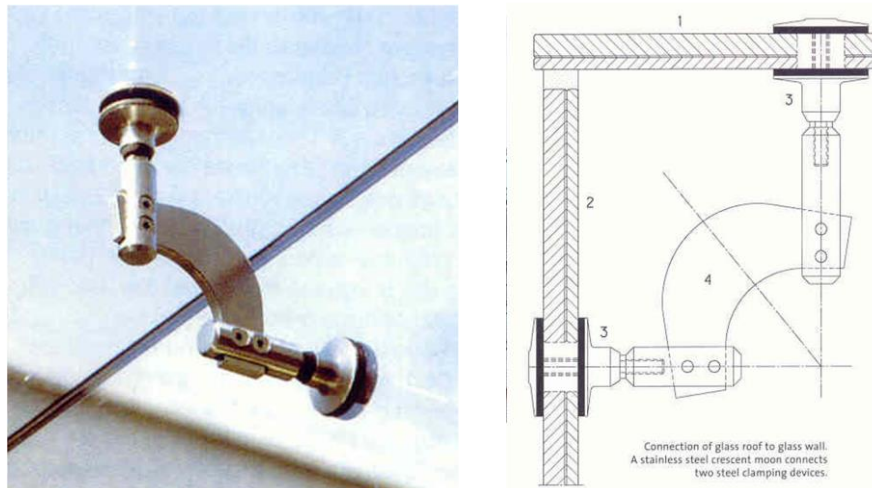


Figura 6: Unión de dos placas de vidrio mediante tornillos.

Sin embargo, este tipo de unión es visible al ojo humano y dada la transparencia del vidrio la unión idónea debería ser acorde a dicha característica del vidrio. Por ello, el principal problema que se aborda en este proyecto es la utilización de un adhesivo transparente que sea sustitutivo a los tornillos mostrados anteriormente. Para ello, se estudiará la unión mediante decalajes, es decir, mediante salientes de vidrio que serán introducidos en entrantes de vidrio, tal y como, se muestra en la *Figura 7*.

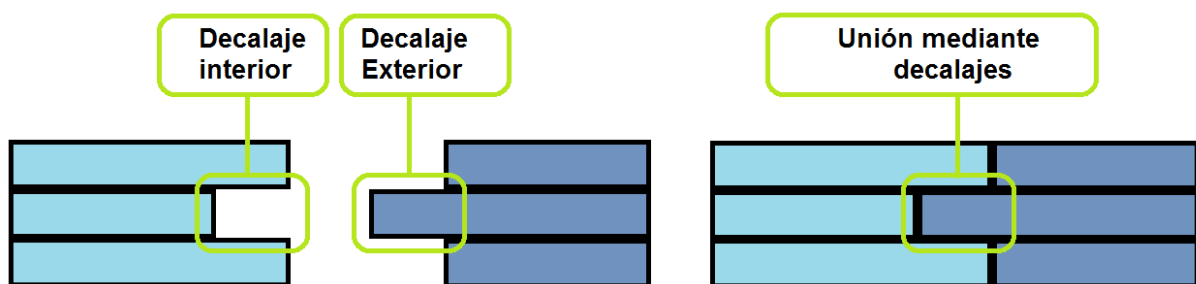


Figura 7: Unión mediante decalajes.

2 Objetivo

El objetivo del presente proyecto es el diseño de una viga de vidrio para su utilización como elemento estructural. Para ello se desarrollarán uniones entre elementos de vidrio, de tal forma que permitan ampliar la dimensión actual de fabricación, sin que esto afecte a las prestaciones específicas y consiguiendo que la unión sea lo más imperceptible posible. Mediante el programa de cálculo por elementos finitos Abaqus CAE se optimizará la geometría de la viga de vidrio en un modelo a escala, de tal forma que las prestaciones mecánicas de la misma sean maximizadas y al mismo tiempo, el decalaje que permite la unión entre las distintas placas de vidrio que conforman la viga quede

minimizado. Finalmente, se procederá a la fabricación de la viga de vidrio a partir de las simulaciones obtenidas, con el objetivo de comparar los resultados, así como estudiar la factibilidad de la fabricación de este tipo de vigas como elemento estructural.

3 Métodos y cálculos

Para llevar a cabo las simulaciones es necesario conocer la geometría inicial, los materiales que conforman la viga, así como las condiciones de contorno a las que va a ser sometida en un ensayo de tracción a cuatro puntos.

3.1 Modelo

Para realizar las simulaciones se ha generado un modelo tridimensional (3D), a pesar del aumento del coste computacional, debido a que al existir un decalaje no simétrico en el centro de la viga, la generación de un modelo unidimensional (1D) o bidimensional (2D) no sería fiable.

3.1.1 Materiales

Para conformar la viga es necesario, por una parte, vidrio, y además dos adhesivos, uno que permite unir las distintas láminas de vidrio aumentando el espesor total de la viga (SentryGlas®), así como la seguridad del mismo en caso de rotura, y otro que permite la unión entre los subconjuntos aumentando la longitud de la viga. El propósito principal de la utilización del SentryGlas® y adhesivo es aumentar el tamaño de fabricación de la viga según se puede observar en la *Figura 8*.

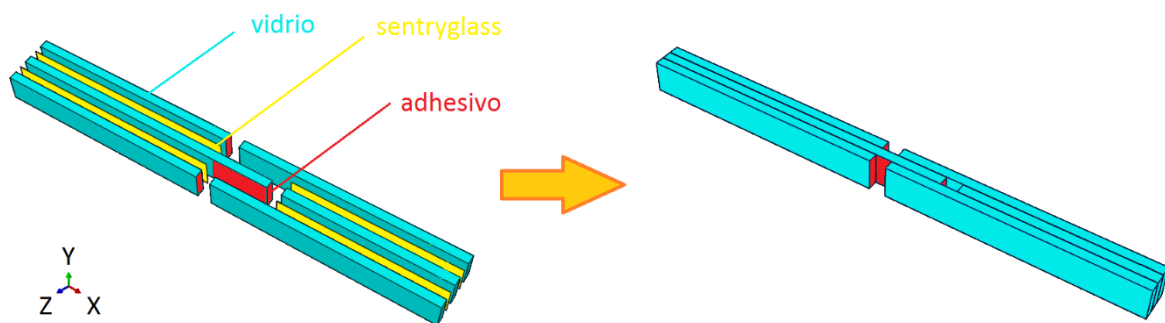


Figura 8: Geometría de la unión entre las láminas de vidrio mediante el SentryGlas® así como el adhesivo.

3.1.1.1 Vidrio

El vidrio se ha simulado con un modelo de comportamiento elástico lineal. Con el módulo de Young y el coeficiente de poisson quedarían definidas las propiedades del vidrio. Como módulo de Young se ha tomado $E=70000\text{MPa}$, y como coeficiente de poisson 0,22.

La resistencia a flexión del vidrio es de 45MPa , sin embargo, se debe tener en cuenta la propagación de grietas, la cual se produce si se alcanza el valor de la tenacidad a la fractura K_{Ic} del material, este valor mide la resistencia de un material a que se produzca fractura frágil cuando hay presente una grieta. En el caso del vidrio común K_{Ic} tiene un

valor de $0,7-0,8 \text{ MPa}\sqrt{m}$, dicho valor es muy inferior al de una aleación de aluminio ($K_c=36 \text{ MPa}\sqrt{m}$) o al de un acero aleado ($K_c=50 \text{ MPa}\sqrt{m}$) [1]. Por tanto, tras aplicar diferentes coeficientes mostrados en la *Figura 9*, se ha establecido como límite de rotura para cargas puntuales 22.5 MPa [2]. Hay que tener en cuenta que, para cargas permanentes, el coeficiente de seguridad a aplicar en los cálculos es muy elevado [3], y el límite de rotura se reduciría a 7.25 MPa .

Tipo de carga	Duración de la carga	k_{mod}
Carga local	Puntual	0,89
Viento	Una ráfaga	1,0
Nieve	Intermedia	0,44
Cargas climáticas	Intermedia	0,5
Peso propio	Permanente	0,29

NOTA (1) El valor de $k_{mod}=0,89$ está basado en una carga local de 30 segundos de duración.
Otros valores deben ser considerados dependiendo del tipo de carga que está siendo evaluada así como del tipo de uso del edificio.

NOTE (2) $k_{mod}=0,44$ puede ser considerada para cargas de nieve que duran entre una semana ($k_{mod}=0,48$) y 3 meses ($k_{mod}=0,41$). Otros valores de k_{mod} pueden ser apropiados dependiendo del clima local

Figura 9: prEn 16612 - Factores de corrección según la duración de la carga [1]

3.1.1.2 SentryGlas®

Para la simulación del SentryGlas® se ha utilizado un modelo de comportamiento hiperelástico neo-Hookeano (ver Anexo 7.3). Los materiales hiperelásticos se caracterizan por tener un comportamiento no lineal, es decir, el material se rigidiza conforme se deforma.

De esta forma se ha definido en Abaqus el y neo-Hookeano, para ello se ha calculado el módulo de rigidez (G) y el módulo de compresibilidad (κ) a partir de los datos proporcionados por el fabricante [5] para una temperatura de 20°C y una duración de la carga de una hora (ver Anexo 7.1). Para implementar estos parámetros en Abaqus, se ha tenido en cuenta que dicho programa define dos relaciones a partir de los parámetros calculados, las cuales son $C10=G/2$ y $D1=2/\kappa$, obteniendo como resultado $C10=84,475 \text{ MPa}$ y $D1=0,001 \text{ MPa}^{-1}$.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Ecuación 1

$$\kappa = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Ecuación 2

3.1.1.3 Adhesivo Araldite 2028-01

Para el adhesivo se han utilizado los datos proporcionados por el fabricante (ver Anexo 7.2), siendo el módulo de Young $E=18\text{MPa}$ y el coeficiente de poisson $0,239$. Para la simulación del adhesivo se ha utilizado un modelo de comportamiento hiperelástico neo-Hookeano, del mismo modo que en el caso del SentryGlas® se han calculado los parámetros $C10=3,632\text{MPa}$ y $D1=0,174\text{MPa}^{-1}$. La tensión máxima soportada por el adhesivo proporcionada por el fabricante es de 10 MPa . Posteriormente, para el decalaje óptimo obtenido, se ha introducido un modelo de daño en el adhesivo siguiendo la curva mostrada en la *Figura 10*, considerando que la iniciación de daño se produce a tracción o cizalladura, pero nunca a compresión. Se ha utilizado un modelo de tipo interfaz cohesiva; en este modelo la iniciación del daño se produce cuando se alcanza, en una de las tres componentes principales $\{t_1, t_2, t_3\}$, la tensión de iniciación de daño fijada previamente. No se ha considerado acoplamiento entre tensiones normales y tangenciales, quedando definido el vector tensión (t), en la parte lineal, del siguiente modo:

$$t = \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = K\varepsilon$$

Donde K es la matriz de rigidez.

Ecuación 3

Donde $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ son las deformaciones nominales, que equivalen a los desplazamientos divididos por el espesor en cada punto de integración (δ_i/T_i) .

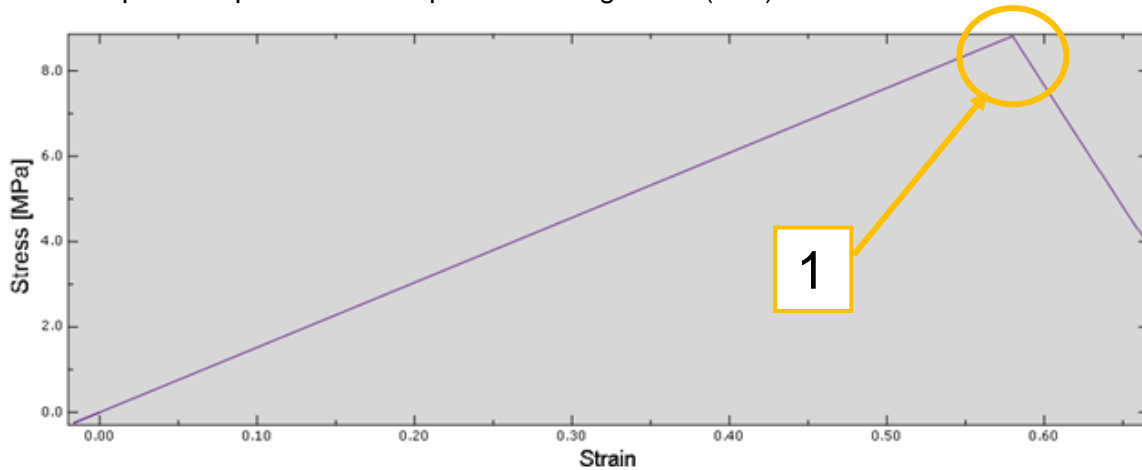


Figura 10: Curva de daño del adhesivo obtenida en Abaqus con datos proporcionados por el fabricante.

La curva de la *Figura 10* muestra una adaptación del comportamiento del adhesivo, de tal forma que es posible determinar cuándo se inicia el daño en el mismo (Punto 1), y el desplazamiento hasta rotura soportado por el adhesivo una vez se ha iniciado el daño. Hay que tener en cuenta la dirección de la interfaz, definiendo la dirección normal en la dirección del espesor de elemento (*Figura 11*).

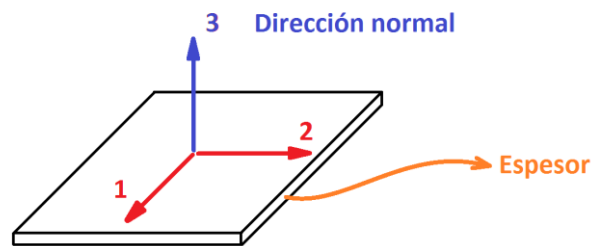


Figura 11: Direcciones de la interfaz.

3.1.1.4 Material apoyos

Para los cuatro apoyos de la máquina de ensayos se ha simulado un material elástico lineal con un módulo de Young mucho mayor que el del vidrio, para que éstos no sean deformables.

3.1.2 Geometría

Para representar la viga, se ha trazado en el plano un bloque rectangular y se ha subdividido en una serie de láminas de vidrio, las cuales quedan unidas entre ellas a través del SentryGlas®, cuyo espesor es de 1,52mm, dicho espesor es el mayor de los proporcionados por el fabricante. De esta forma se conforman dos subconjuntos, que finalmente quedarán unidos mediante el adhesivo comentado previamente. Esto queda reflejado en la *Figura 12* y en la *Figura 13*. La longitud total de 3000mm de la viga queda impuesta por la máquina de ensayos, sin embargo el decalaje central será variado para ser optimizado posteriormente. Por otro lado el espesor de cada una de las tres láminas de vidrio utilizadas es de 10mm y la altura de dichas láminas es de 200mm.

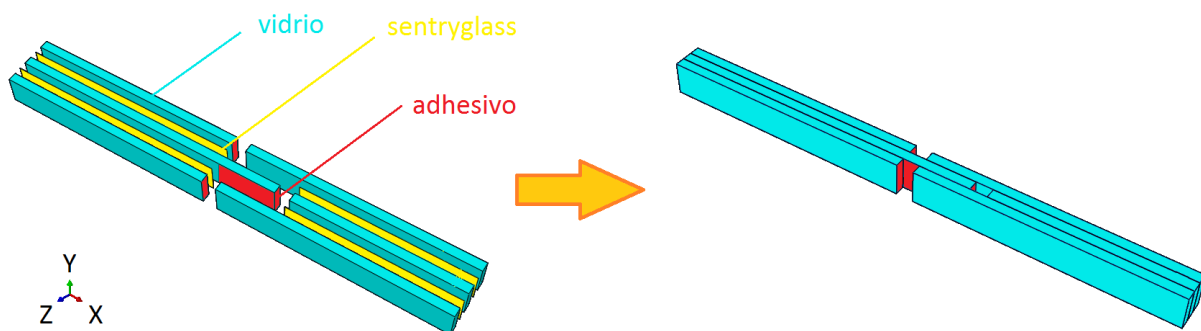


Figura 12: Geometría de la unión entre las láminas de vidrio mediante el SentryGlas® así como el adhesivo.

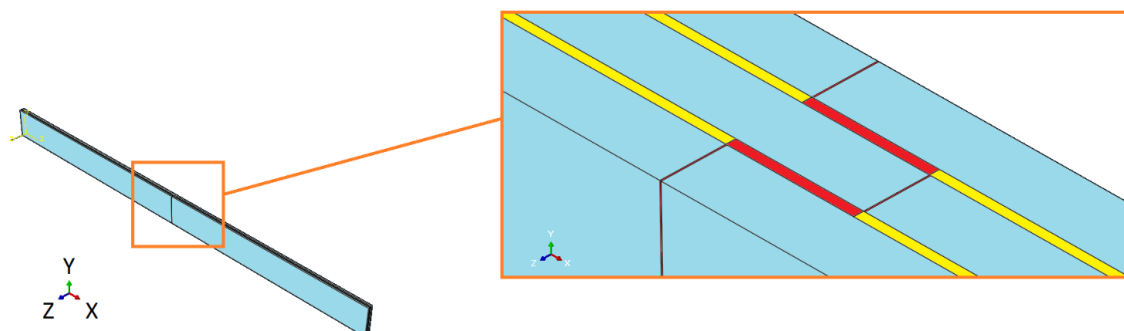


Figura 13: Geometría de la unión final simulada en Abaqus.

3.1.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno quedan impuestas por la máquina de ensayos en la que será realizado un ensayo de flexión por cuatro puntos cuya representación se observa en la *Figura 14*.

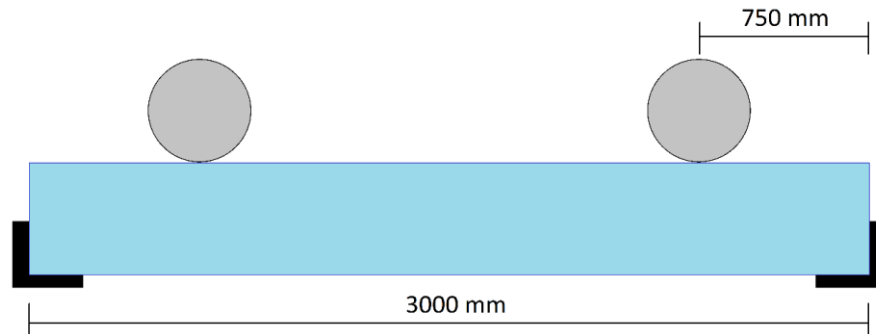


Figura 14: Situación de la viga en la máquina de ensayos.

Tal y como se muestra en la *Figura 15*, en los apoyos superiores se ha impuesto una carga total en el eje Y de 10000N, aplicada de forma lineal en intervalos de 500N.

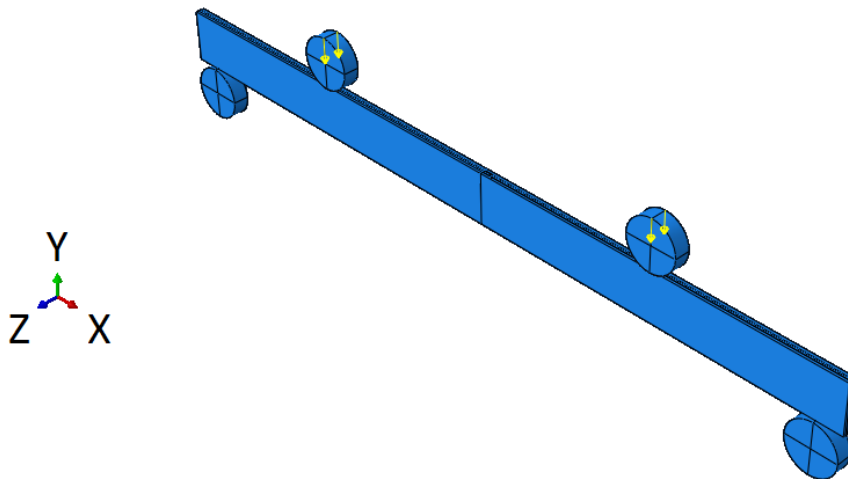


Figura 15: Desplazamiento de los apoyos superiores.

Se han limitado los desplazamientos en el eje Z en el plano simétrico de la viga y se han limitado los desplazamientos en el eje X en el centro de la viga, según se muestra en la *Figura 16*, para impedir el desplazamiento como sólido rígido de la misma. Finalmente se han fijado los apoyos inferiores sobre los que se sustenta la viga.

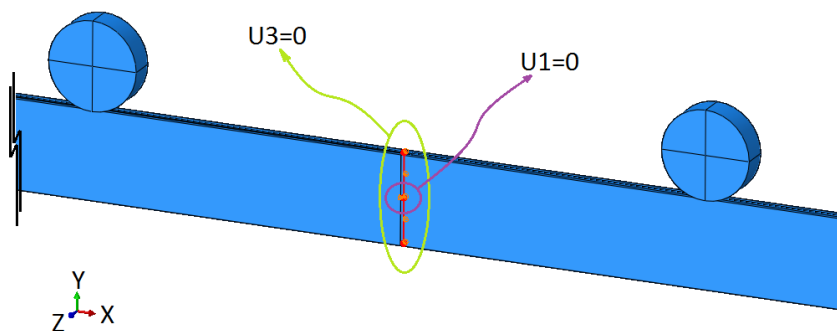


Figura 16: Desplazamientos limitados de la viga.

3.1.4 Contacto

Se ha establecido la superficie de contacto entre el vidrio y los apoyos sin fricción. Como superficie maestra se ha tomado la superficie de los apoyos y como esclava la del vidrio *Figura 17*.

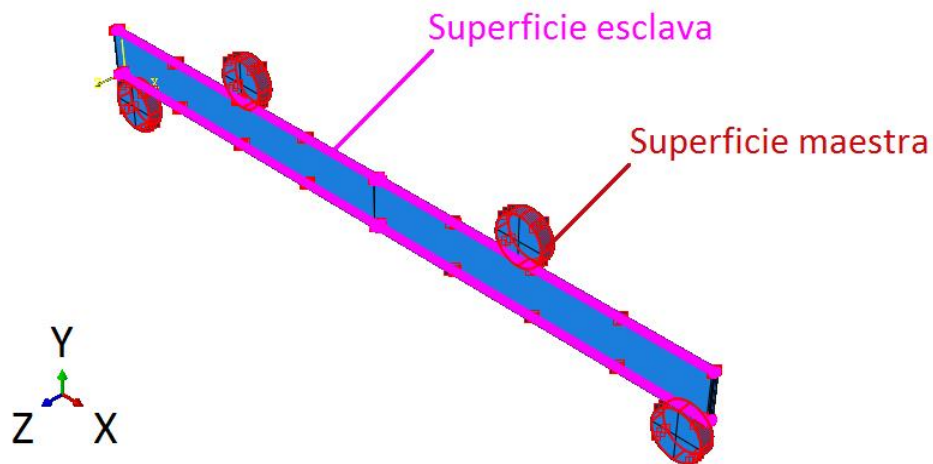


Figura 17: Contacto definido entre los apoyos y la viga.

3.1.5 Mallado

Para el vidrio y el SentryGlas® se han utilizado hexaedros con aproximación lineal, en concreto en Abaqus se ha seleccionado el elemento C3D8 (C=continuo, 3D=3 Dimensiones, 8=Nodos).

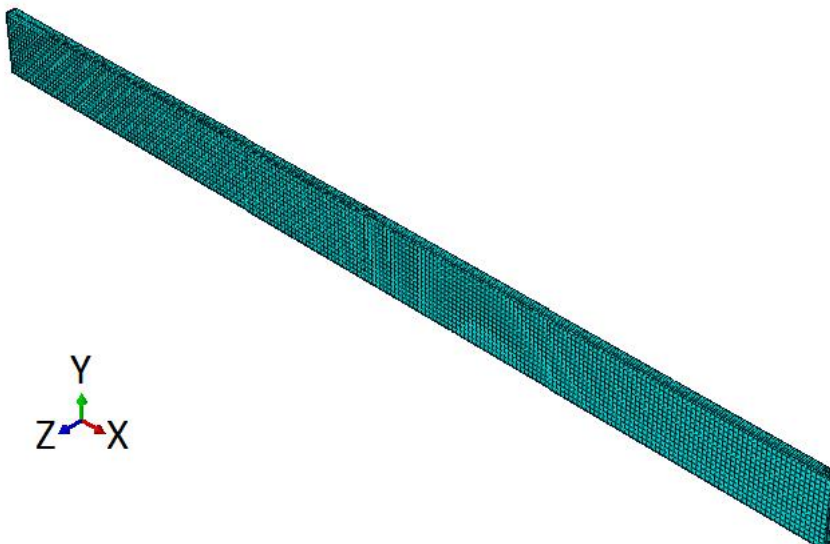


Figura 18: Mallado viga 3D.

Para el adhesivo, inicialmente se han utilizado hexaedros con aproximación lineal (C3D8), y para la simulación del modelo de daño, en el caso de la viga con el decalaje

óptimo, se han utilizado elementos cohesivos, dentro del programa Abaqus elementos COH3D8 hexaédricos (COH=cohesivo, 3D=3 Dimensiones, 8=Nodos). Los elementos cohesivos son utilizados para pequeños espesores y materiales tipo el adhesivo que se va a utilizar en el presente trabajo.

Se han generado un total de 48320 elementos.

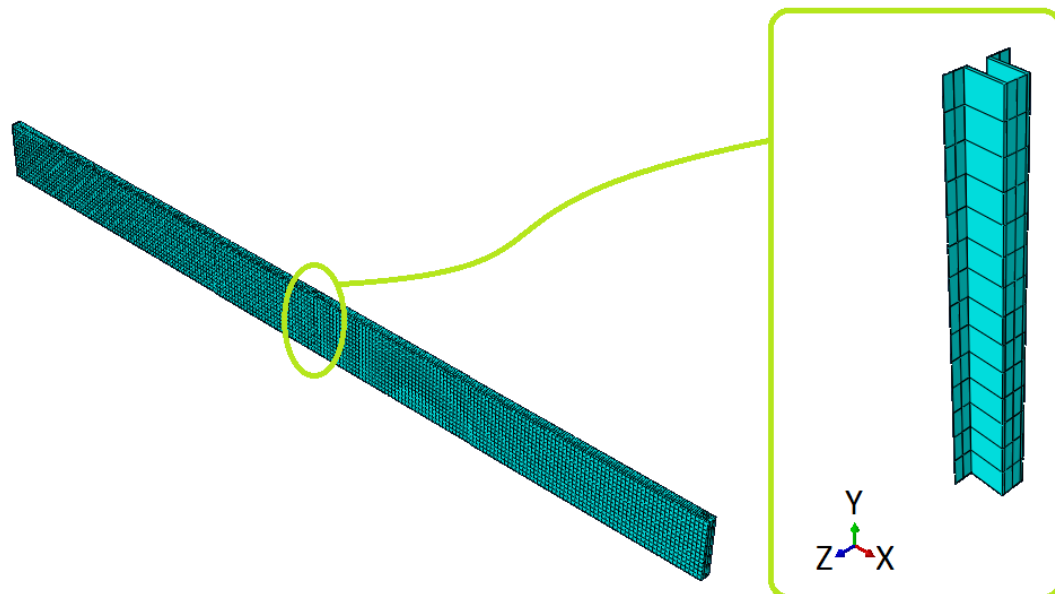


Figura 19: Mallado 3D de la viga y adhesivo (en verde).

3.1.6 Simulación

Para llevar a cabo las simulaciones, se ha programado el código necesario mediante comandos en Python en el programa Abaqus/CAE 6.12 (ver Anexo 7.3).

Esta técnica permite parametrizar el modelo en función de los parámetros geométricos elegidos. De esta forma se puede, por ejemplo, variar el decalaje del vidrio para ver su influencia cambiando únicamente un dato numérico, en vez de tener que realizar un modelo totalmente nuevo. En definitiva, se ha rentabilizado el tiempo evitando repetir el proceso completo para cada caso estudiado.

4 Resultados

4.1 Comparación simulaciones de distintas composiciones de vidrio

Inicialmente se ha realizado una simulación de la viga con, únicamente, la unión de las láminas de vidrio de 10mm entre sí, es decir, suponiendo que la longitud de dichas láminas es la longitud total de la viga. Si comparamos dicha simulación con la realizada en una viga maciza de vidrio, se observa que las tensiones máximas a tracción son similares para una misma carga de 10000N, siendo de 15MPa en la *Figura 20*. La flecha máxima para dicha carga es de 2mm (*Figura 21*), por tanto, la unión de láminas de vidrio mediante SentryGlas®, no afecta en exceso a las propiedades mecánicas de la viga.

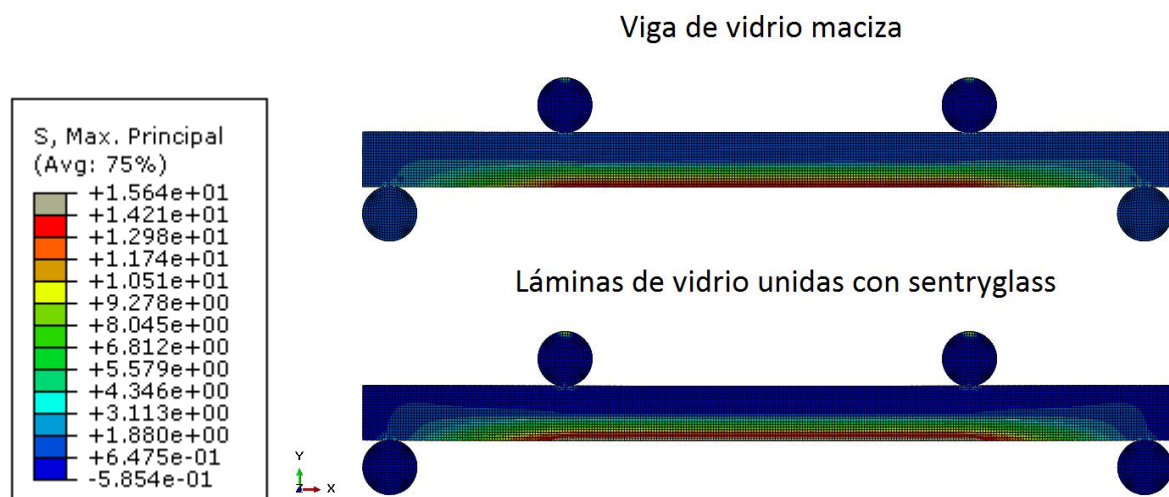


Figura 20: Comparación tensión máxima (MPa) a tracción para una carga de 10000 N.

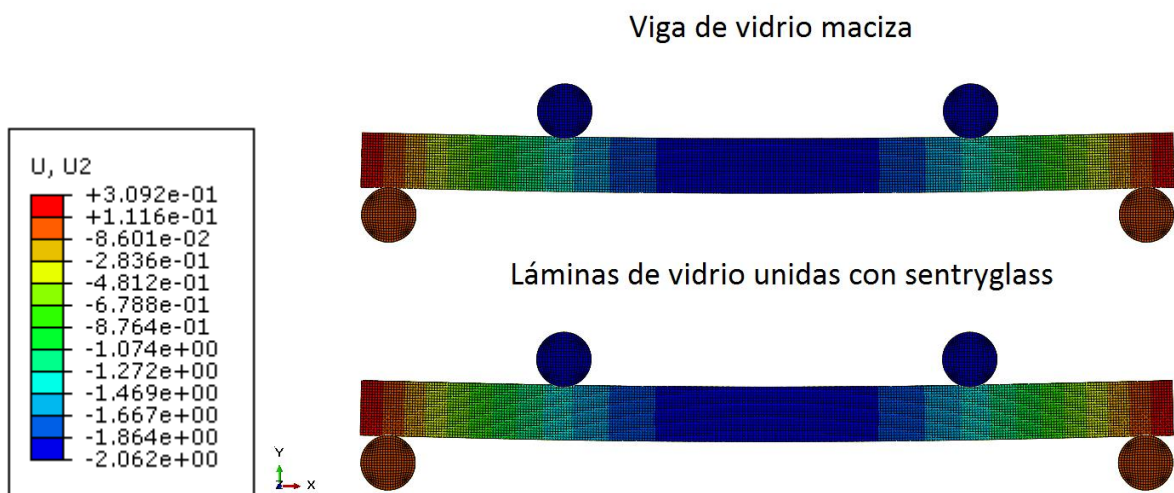


Figura 21: Flecha máxima (mm) para una carga de 10000 N.

Si se compara la viga sin decalaje con SentryGlas® con la simulación que se ha realizado para un decalaje inicial de 20mm (Figura 23), se observa que la tensión máxima para la viga subdividida y unida mediante el decalaje es de 28.25MPa, y para la viga sin decalaje es de 15.64MPa, aplicando una carga en ambos casos de 10000N. Comparando la flecha máxima en la Figura 24, para el primer caso es de 2.06mm, sin embargo, para el segundo 7.26mm, esto se traduce en que la unión mediante el adhesivo influye en las propiedades mecánicas del vidrio, por ello a continuación se va a estudiar el caso óptimo en el que dichas propiedades se vean afectadas en menor medida.

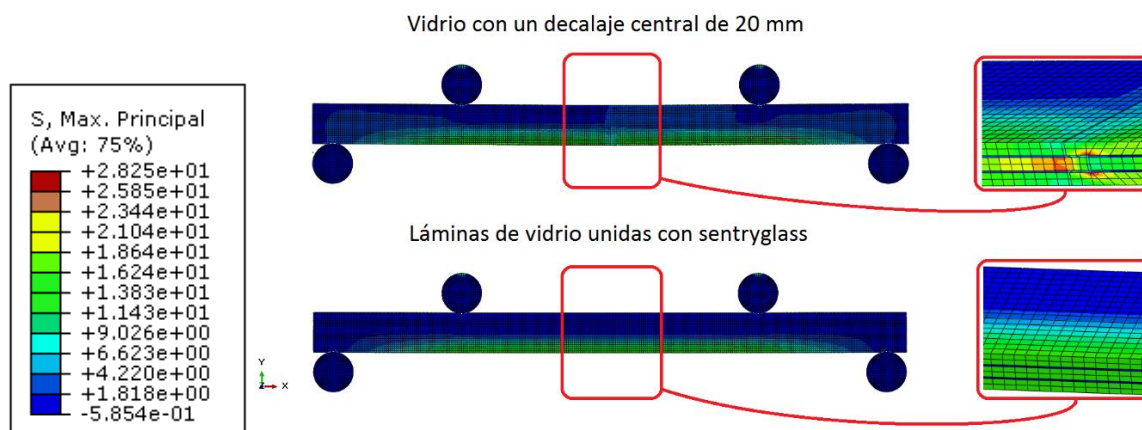


Figura 23: Comparación tensión máxima (MPa) a tracción para una carga de 10000 N.

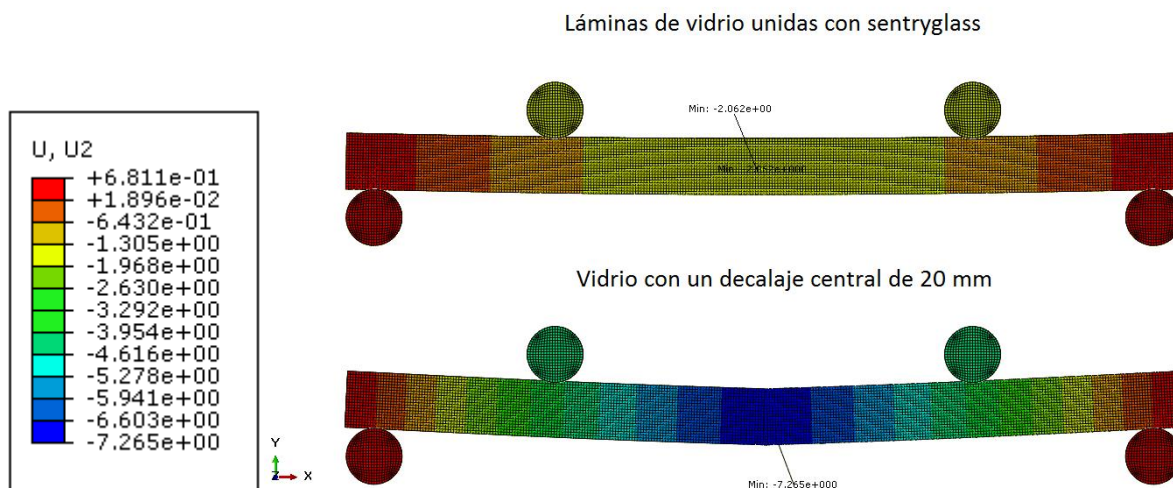


Figura 24: Flecha máxima (mm) para para una carga de 10000 N.

4.2 Estudio del decalaje óptimo

Si nos centramos en la zona donde el vidrio alcanza el límite de rotura, observamos que para decalajes menores de 5mm la zona donde se alcanza dicho límite se sitúa por debajo de los apoyos superiores (Figura 25), sin embargo para decalajes mayores de 5 mm se sitúa en la zona inferior de la viga, en la lámina de vidrio situada en el centro, la cual sobresale del resto previamente a ser unida con la otra fracción de viga (Figura 26).

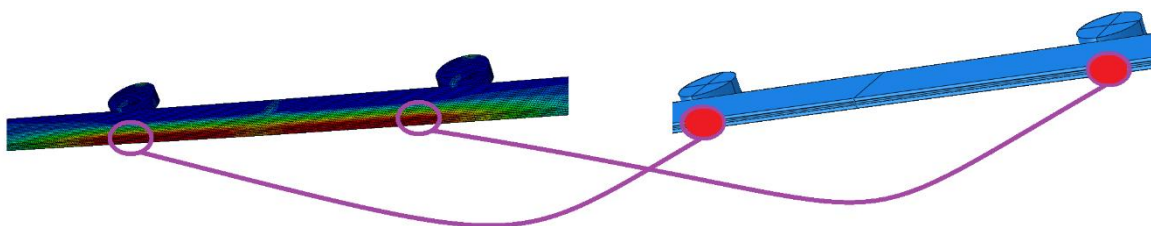


Figura 25: Zona de rotura del vidrio.

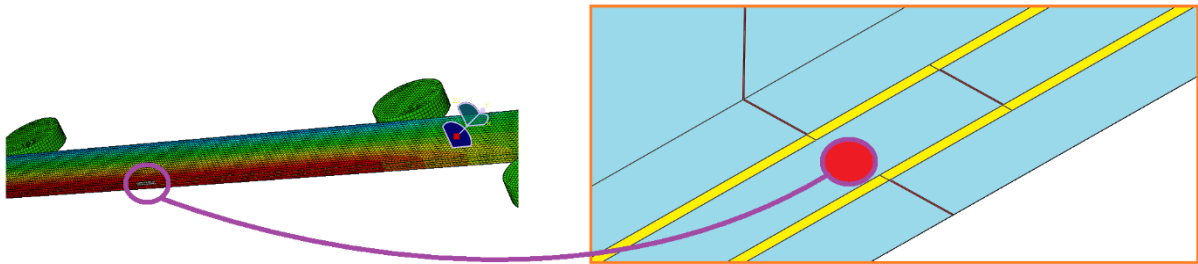


Figura 26: Zona de rotura del vidrio.

Si nos centramos en el comportamiento del adhesivo, vemos que la zona de máxima deformación se sitúa en la zona inferior tanto para pequeños como para grandes decalajes (Figura 27).

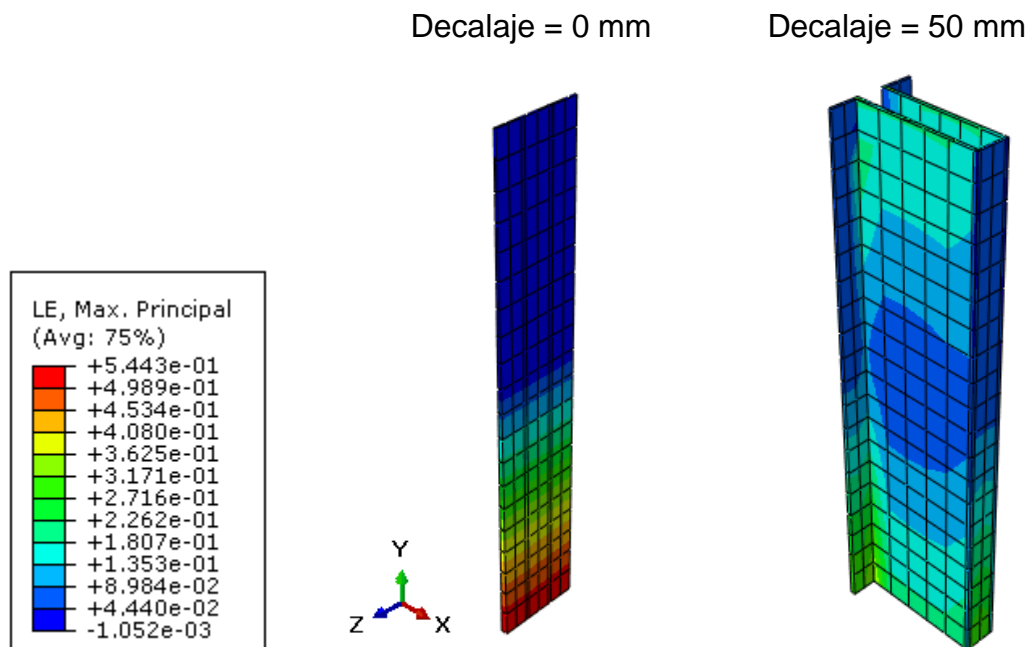


Figura 27: Zona de máxima deformación adhesivo para una misma carga.

Realizando simulaciones para distintos decalajes se puede obtener el óptimo comparando los resultados de las distintas simulaciones, para ello se ha representado la tensión máxima del vidrio, en función de la carga aplicada, para una serie de decalajes que van desde 0 mm hasta 300 mm.

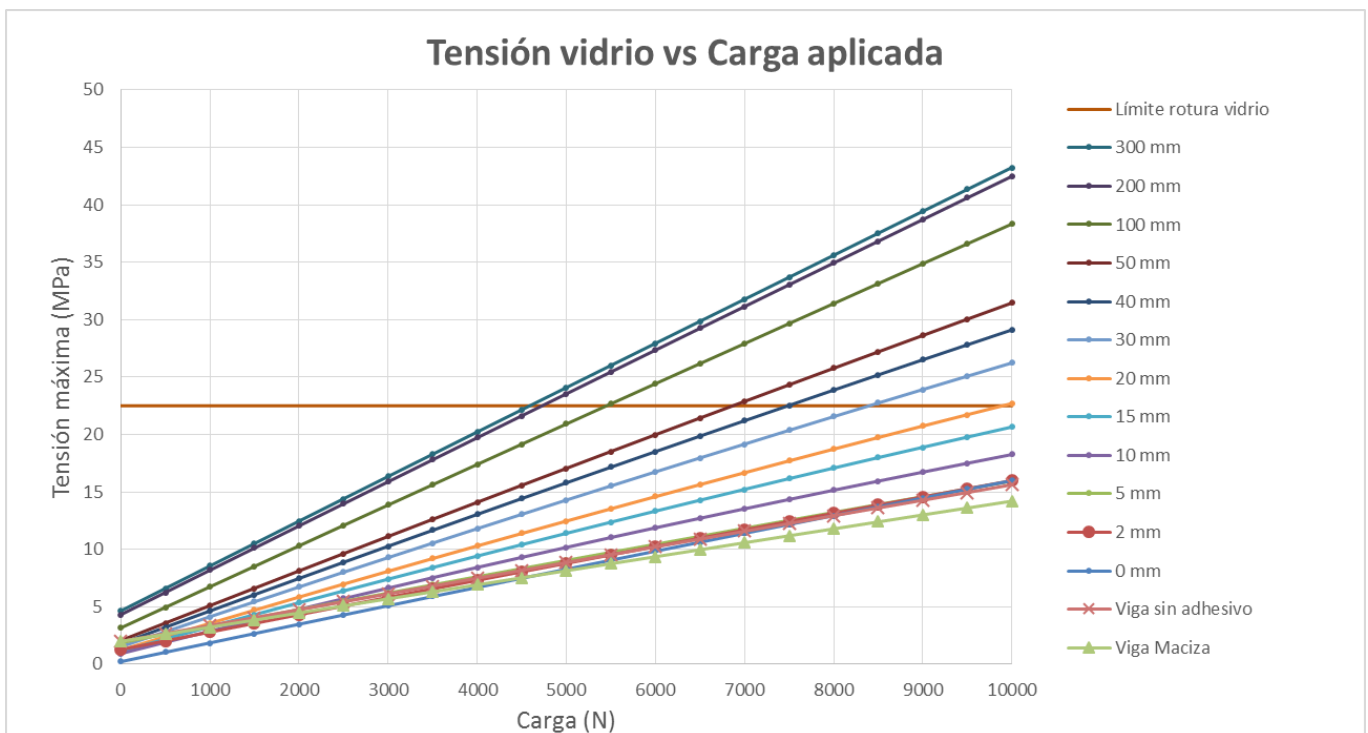


Figura 28: Comparativa de la tensión máxima en el vidrio para distintos decalajes.

En la *Figura 28* se observa que conforme aumentamos el decalaje la tensión máxima en el vidrio aumenta según se aumenta la carga, por tanto lo óptimo sería reducir al máximo el decalaje, es decir, hacer una unión a testa sin decalaje. Sin embargo, además del comportamiento del vidrio se ha de tener en cuenta el comportamiento del adhesivo, tal y como veremos a continuación.

Si se analiza la flecha máxima (*Figura 29*), se observa que conforme se aumenta el decalaje la viga tiende a flectarse menos, asemejándose al comportamiento de una viga maciza.

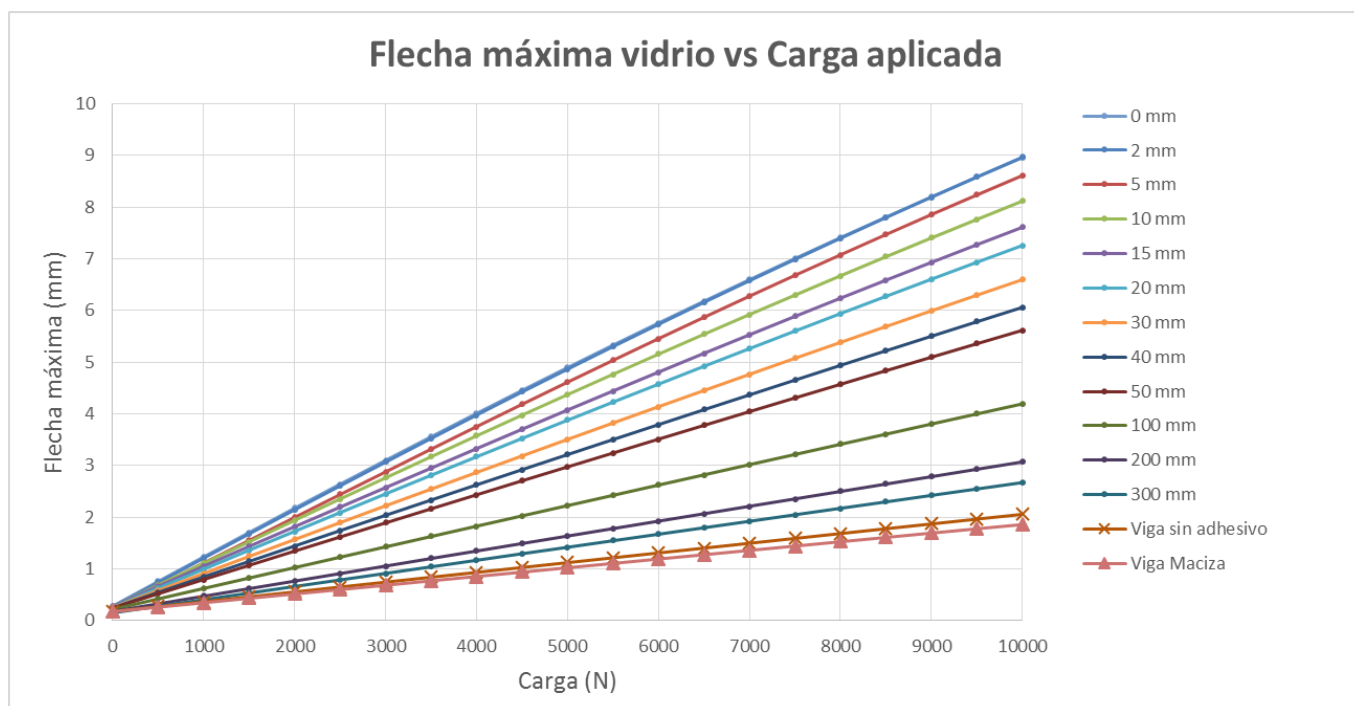


Figura 29: Comparativa de la flecha máxima de la viga para distintos decalajes.

Si como hemos comentado previamente, nos centramos en el comportamiento del adhesivo, se observa que conforme disminuye el decalaje el límite de rotura del adhesivo se supera antes (*Figura 30*) y la deformación es mayor (*Figura 31*). Es decir, a menor decalaje el adhesivo romperá antes. Por tanto, se hace necesario establecer el decalaje óptimo en el cual, tanto la tensión máxima en el vidrio como la tensión máxima del adhesivo no se vean superadas.

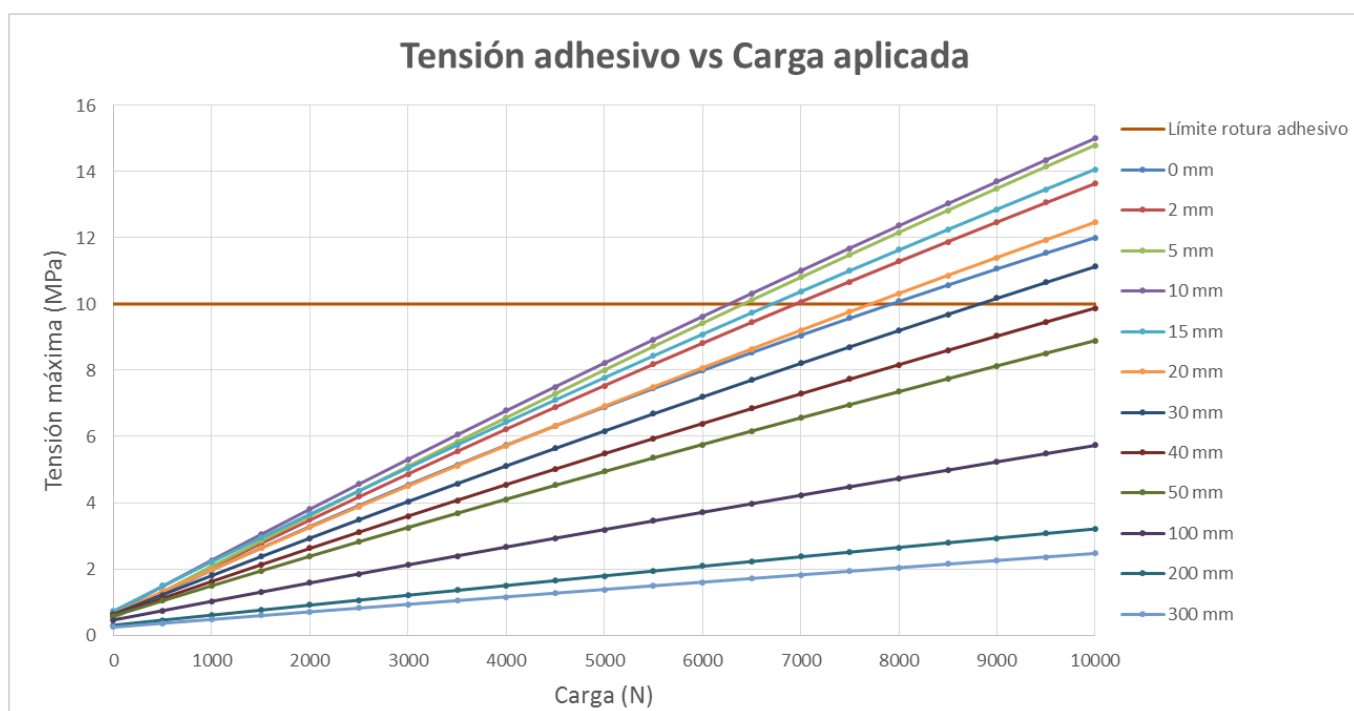


Figura 30: Comparativa de la tensión máxima en el adhesivo para distintos decalajes.

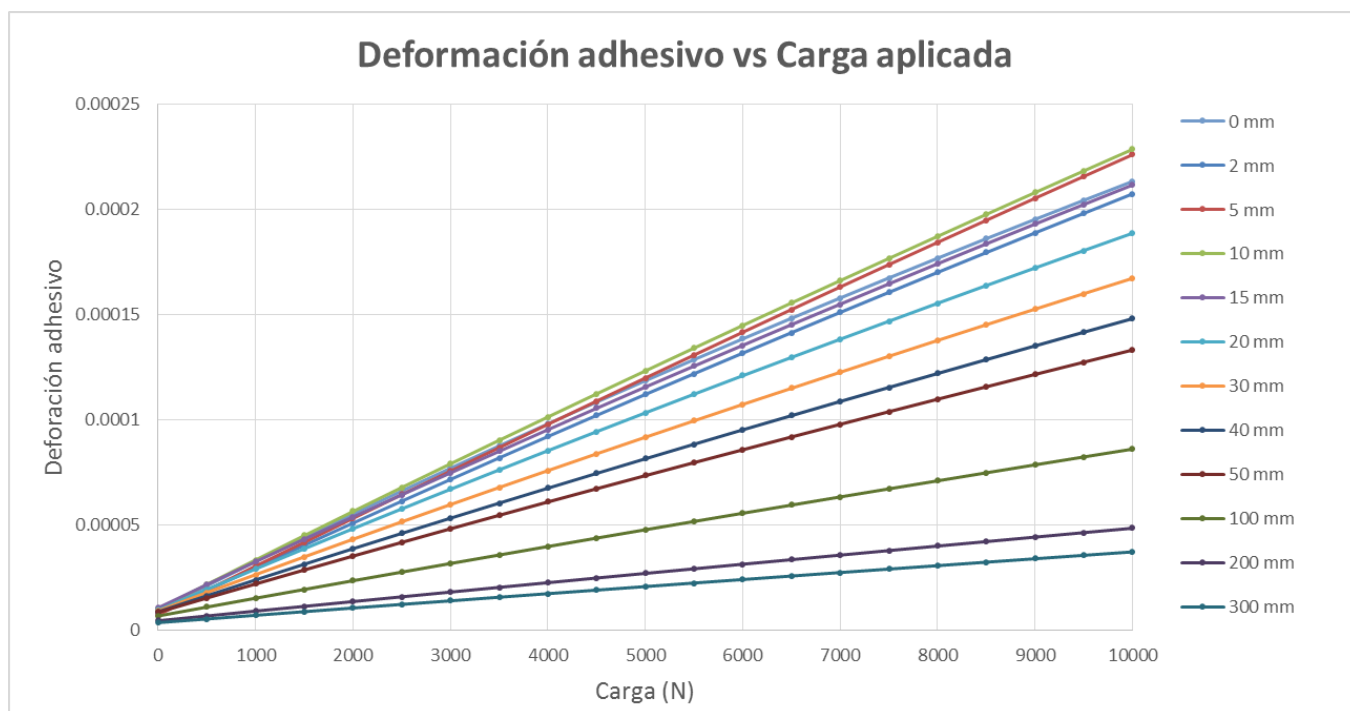


Figura 31: Comparativa de la deformación máxima del adhesivo para distintos decalajes.

Representando la tensión máxima del vidrio y el adhesivo para determinadas cargas, cada vez superiores, se puede delimitar la zona óptima donde el adhesivo y el vidrio no superen sus límites de rotura. En la *Figura 32*, para 3000 N se observa que en ningún momento se supera la tensión de rotura del vidrio ni del adhesivo por tanto, para dicha carga, sería factible la utilización de cualquier decalaje comprendido entre 0 y 3000 mm.

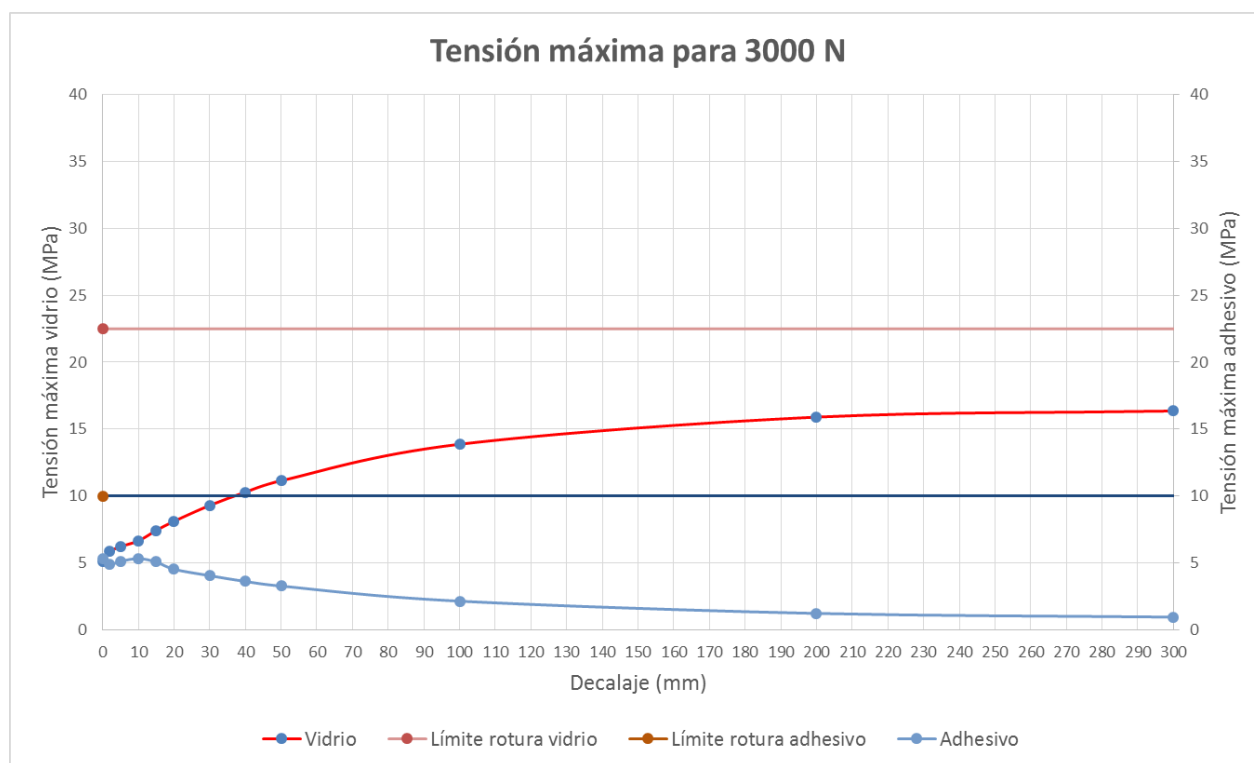


Figura 32: Tensión máxima del vidrio y adhesivo para distintos decalajes, para una carga de 3000N.

Aumentando la carga a 6000 N, en la *Figura 33* se observa que para decalajes superiores a 70 mm, el vidrio superaría su límite de rotura, por lo que no sería factible fabricar la viga para decalajes mayores de dicho límite.

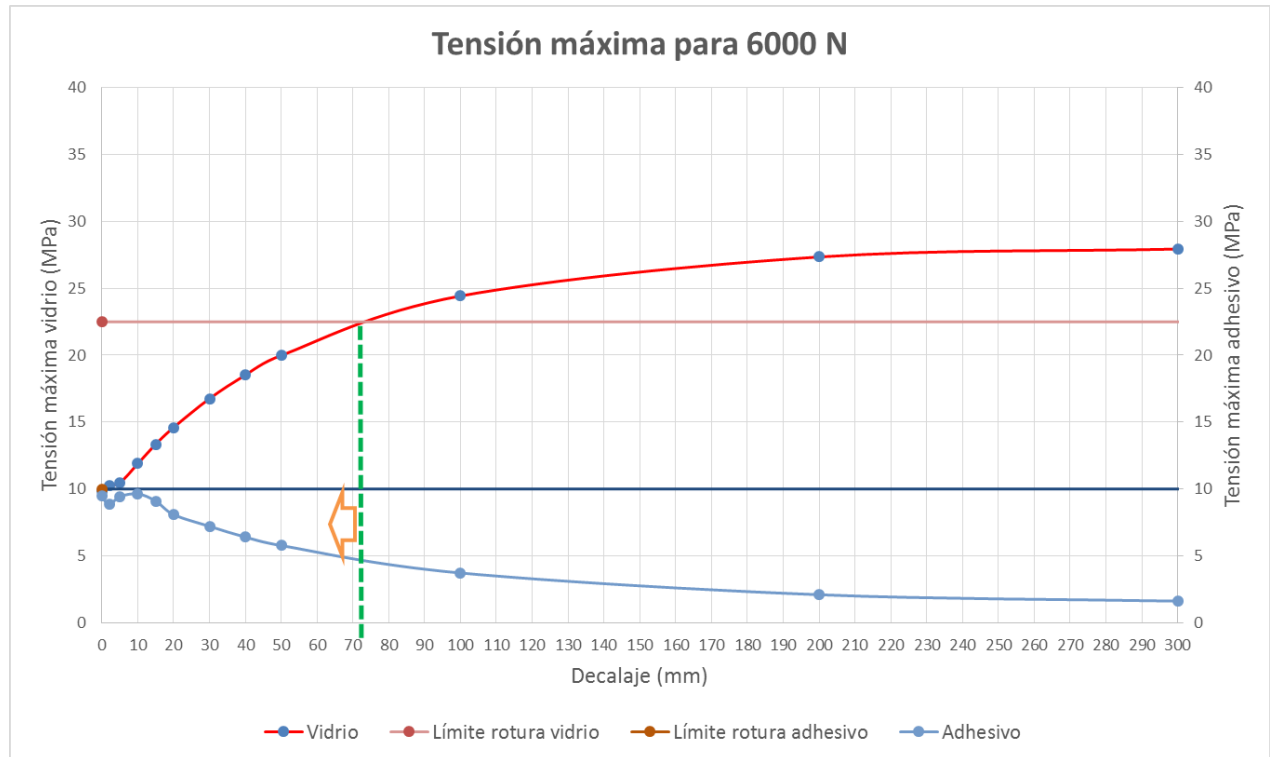


Figura 33: Tensión máxima del vidrio y adhesivo para distintos decalajes, para una carga de 6000N.

Aumentando la carga a 8000 N, en la *Figura 34* se observa que para decalajes superiores a 35 mm, el vidrio superaría su límite de rotura, a su vez, para decalajes menores de 22 mm, se superaría el límite de rotura del adhesivo, por tanto, el decalaje óptimo quedaría acotado entre 22 mm y 35mm. Si aumentásemos la carga a 9000 N, en la *Figura 35* se observa que no sería factible fabricar la viga debido a que fallaría tanto el adhesivo como el vidrio. Por tanto, tras analizar los resultados, se establece como valor óptimo un decalaje de 30 mm.

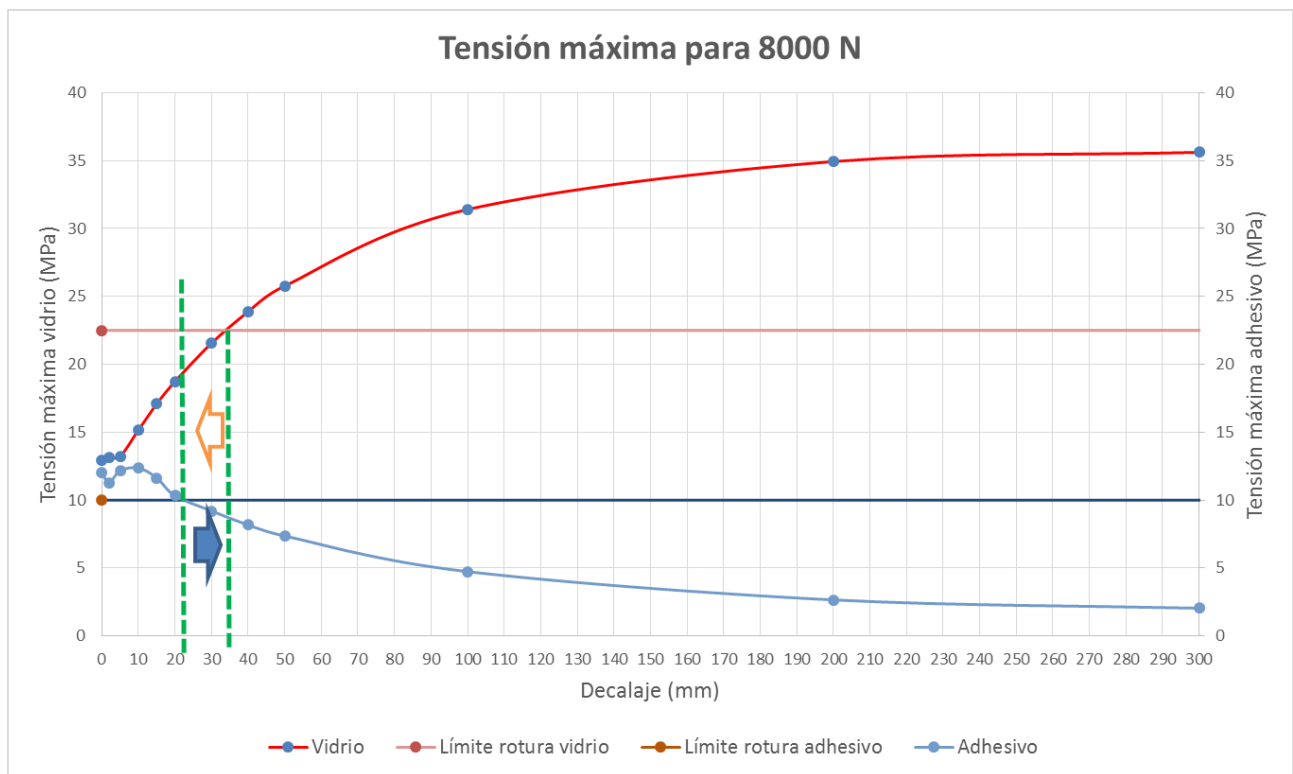


Figura 34: Tensión máxima del vidrio y adhesivo para distintos decalajes, para una carga de 8000N.

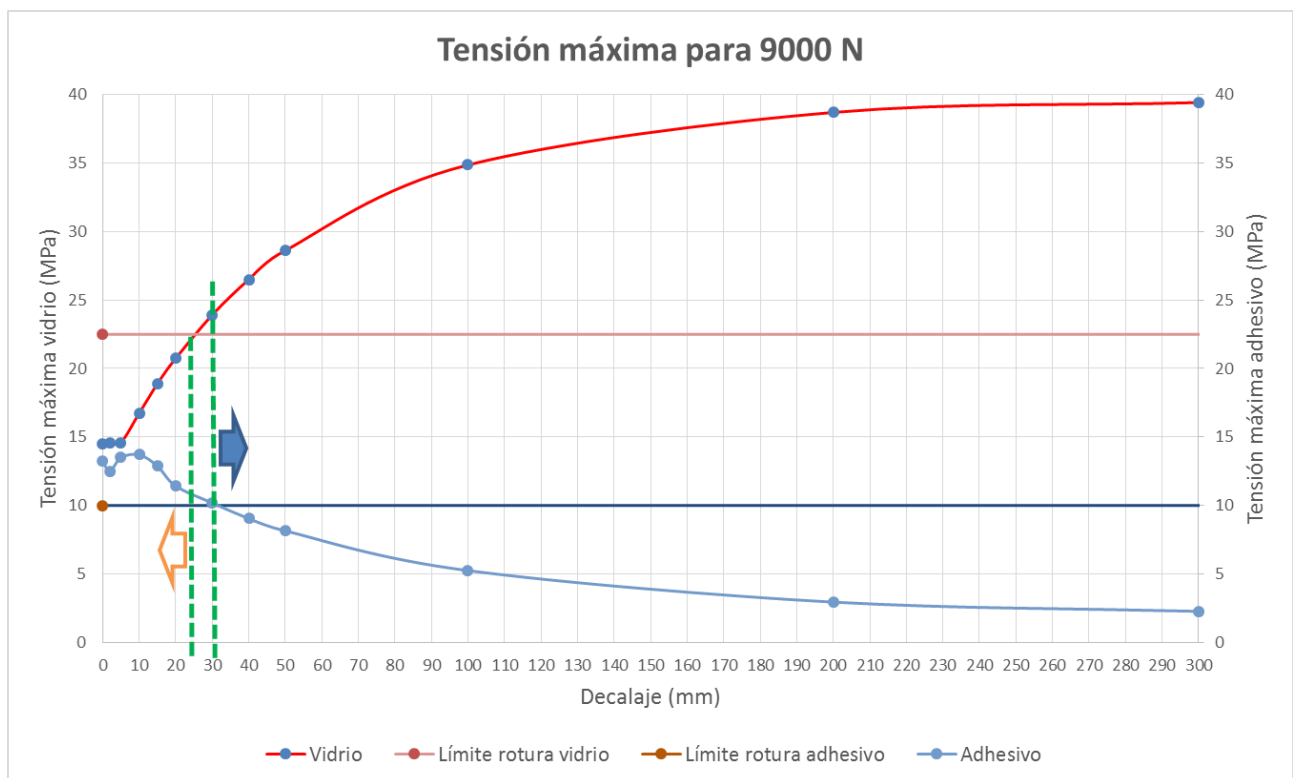


Figura 35: Tensión máxima del vidrio y adhesivo para distintos decalajes, para una carga de 9000N.

4.3 Análisis del modelo de daño del adhesivo

Una vez realizada la simulación del modelo de daño para la viga con un decalaje de 30mm, introduciendo la curva mostrada en la Figura 10, se observa que el adhesivo falla posteriormente a la rotura de la viga, ya que en la *Figura 36* en el punto 1 se observa que la tensión máxima del vidrio es superada antes de que lo sea la tensión máxima del adhesivo. También en la *Figura 37*, se observa que la acumulación de daño en el adhesivo, denominada como QUADRECT, llega a su límite 1 cuando el vidrio ha superado su límite de rotura. De lo que se deduce que la viga no fallará por el adhesivo, sino que lo hará cuando se fracture la zona inferior del vidrio central.

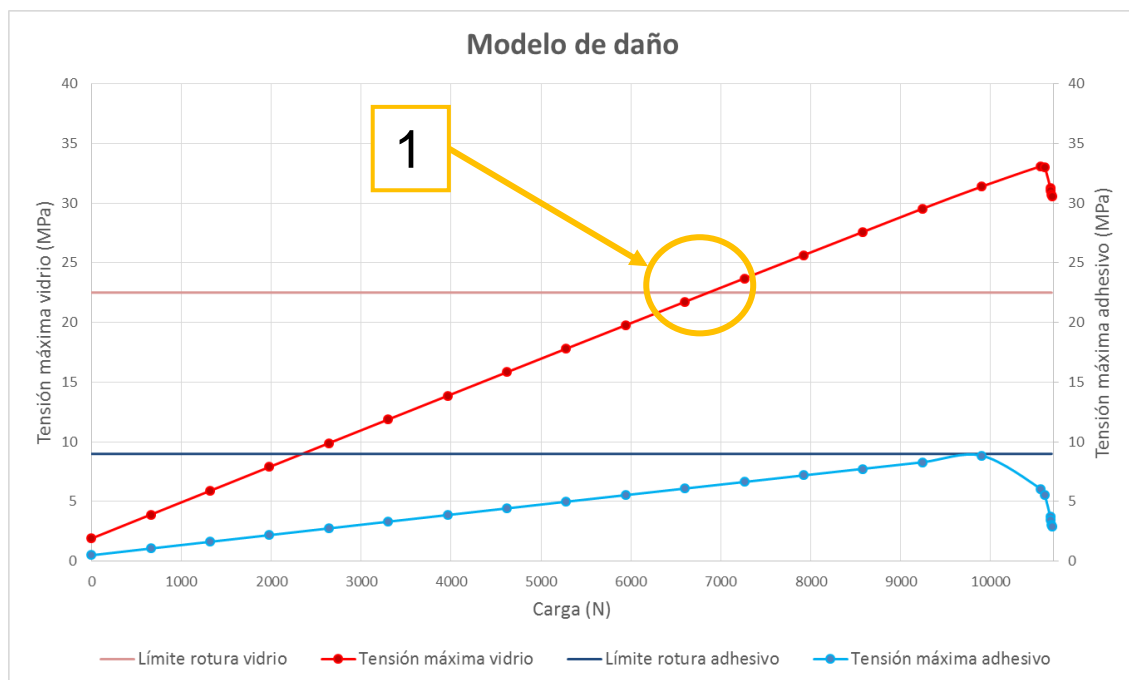


Figura 36: Situación del adhesivo previa y posteriormente a la rotura del vidrio.

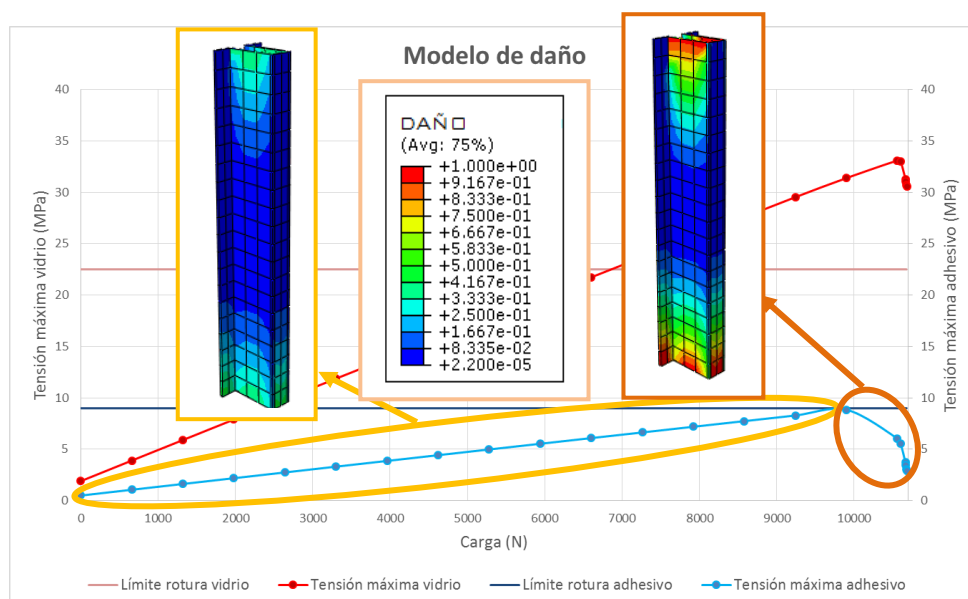


Figura 37: Acumulación de daño en el adhesivo.

4.4 Fabricación de la viga

A partir de los resultados obtenidos en la simulación, se establece como diseño óptimo para cargas de 10000N la viga unida mediante un decalaje de 30mm. Esta viga es la que se fabrica y ensaya para la validación de la simulación.

4.4.1 Proceso de corte

Inicialmente el vidrio de 10 mm es adquirido en planchas de 3000 mm x 6210 mm. Para reducir su tamaño al deseado es necesario un proceso de corte, en este caso mediante una mesa de corte que dispone de una rulina con punta de diamante (*Figura 38*). El tamaño primitivo de las láminas de vidrio es 3 mm mayor en cada lado de la geometría final, ya que el vidrio es pulido quedando a la medida deseada.



Figura 38: Mesa de corte del vidrio.

4.4.2 Proceso de pulido

Tras cortar el vidrio es conveniente un proceso de pulido para eliminar las imperfecciones y micro fisuras que se generan durante el proceso de corte pudiendo provocar la rotura del vidrio en posteriores tratamientos térmicos, y evitar que el vidrio sea cortante. Para pulir las láminas a la medida final se utilizó una máquina canteadora bilateral (*Figura 39*), quedando como resultado las láminas con los cantos pulidos mostrados en la *Figura 40*.



Figura 39: Canteadora bilateral.

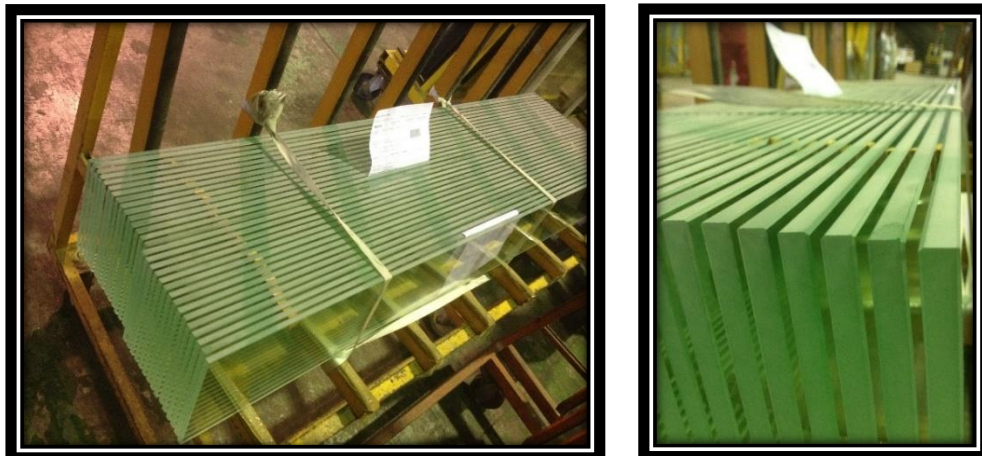


Figura 40: Resultado de las láminas una vez pulidas.

4.4.3 Proceso de laminado en bolsa de vacío

Una vez el vidrio ha sido pulido se procede a laminar en bolsa de vacío. Este proceso es recomendado para multi-laminados, ya que se reduce el riesgo de defectos relativos a aire atrapado, para ello se ensamblan tres láminas de vidrio con la disposición mostrada previamente en la *Figura 12*, introduciendo una lámina de SentryGlas® entre vidrio y vidrio para cada uno de los dos subconjuntos de la viga que van a ser conformados. Cuando se han ensamblado los dos subconjuntos se introducen por separado en una bolsa, colocando una tira porosa a lo largo de los bordes del laminado dentro de la bolsa de plástico para permitir la desaireación completa del laminado, tal y como se muestra en la *Figura 41*.

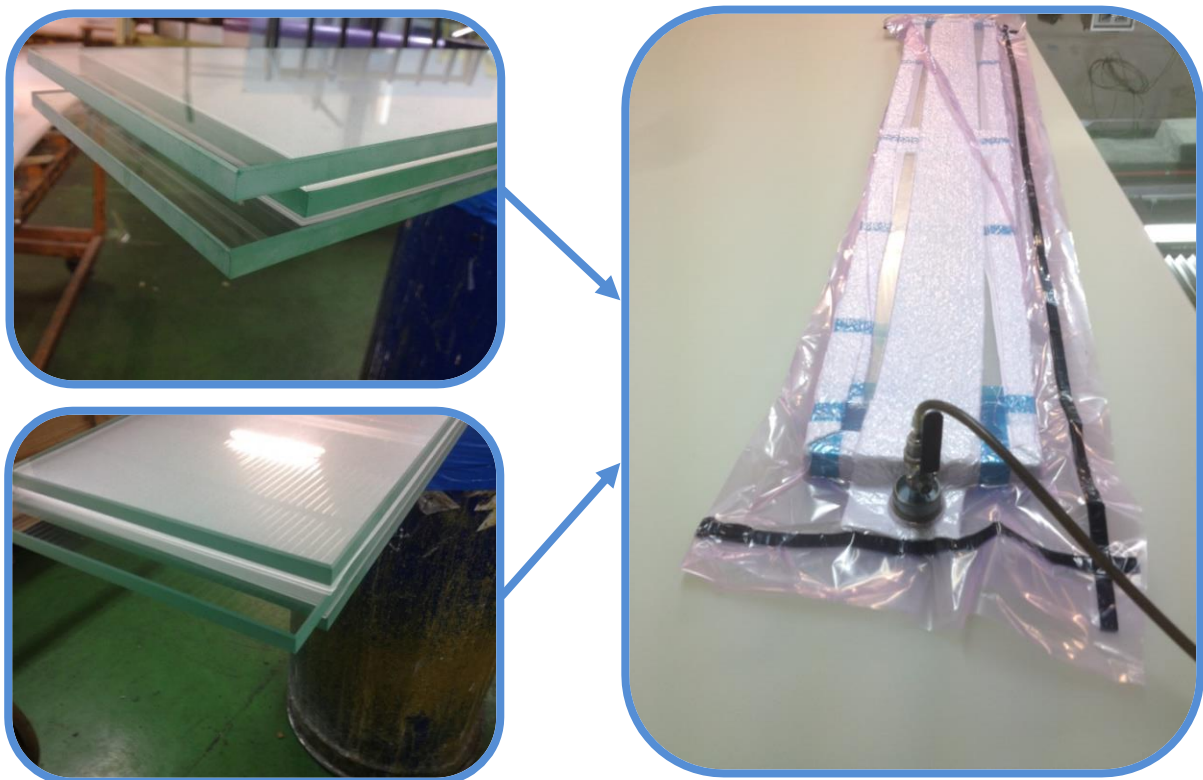


Figura 41: Proceso de extracción del aire.

4.4.4 Proceso de autoclave

Cuando la bolsa ha sido preparada se introduce en el autoclave (*Figura 42*), sometiéndose a una temperatura de 130-135 °C y una presión de 12 - 14 bar, durante un tiempo de mantenimiento de al menos 60 minutos. Posteriormente se enfría el autoclave a una velocidad mínima de 2.2°C/min. La *Figura 43* muestra un ciclo típico de autoclave utilizando SentryGlas®.

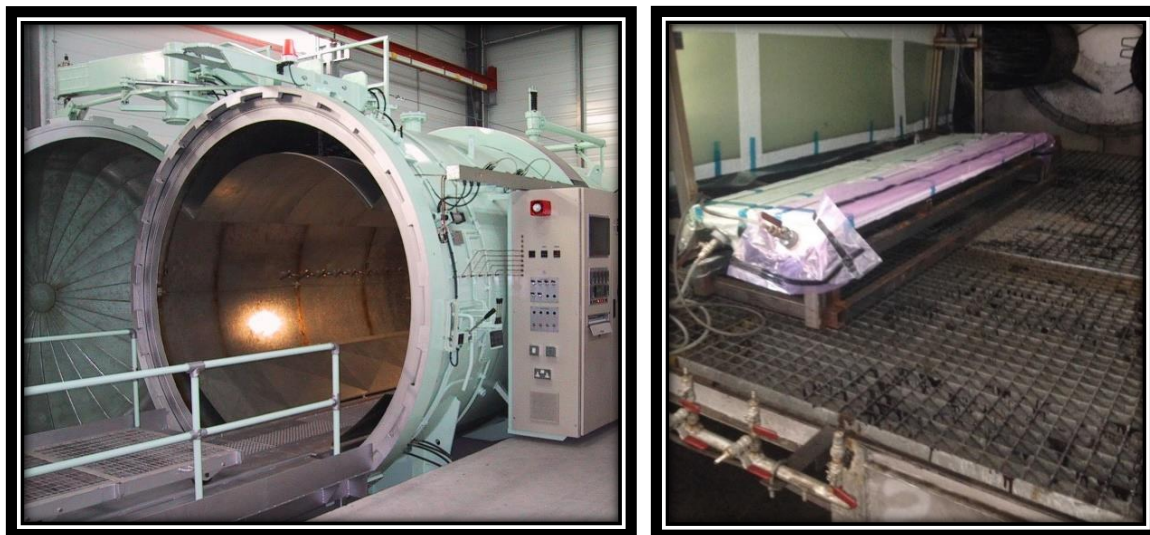


Figura 42: Bolsa de vacío en autoclave.

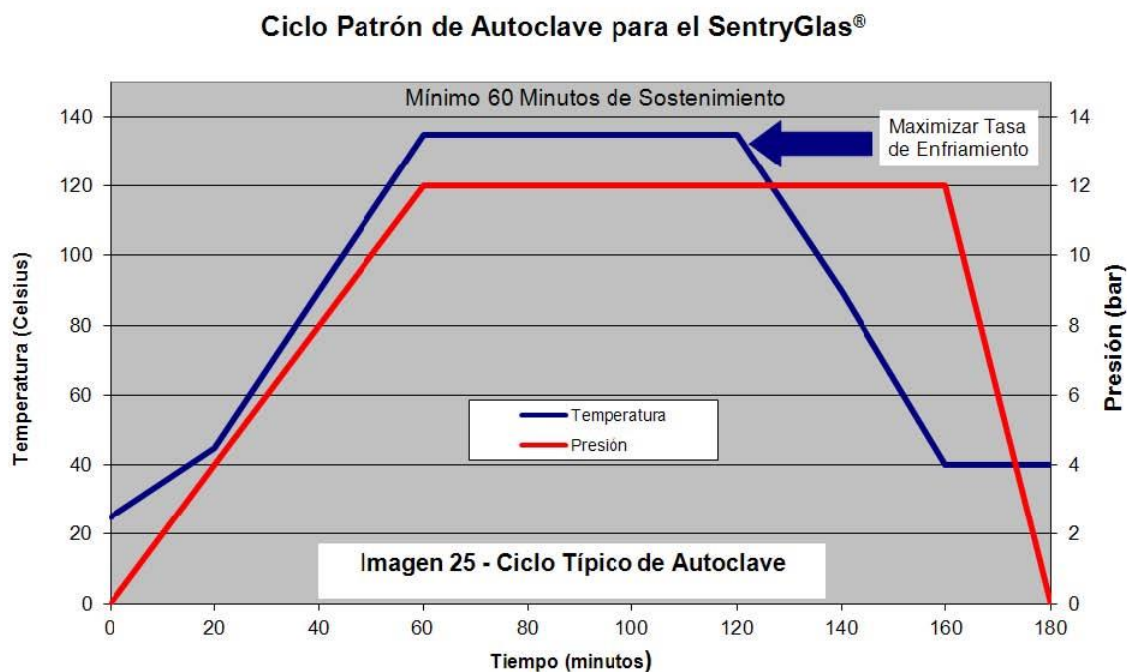


Figura 43: Ciclo típico utilizado en el autoclave.

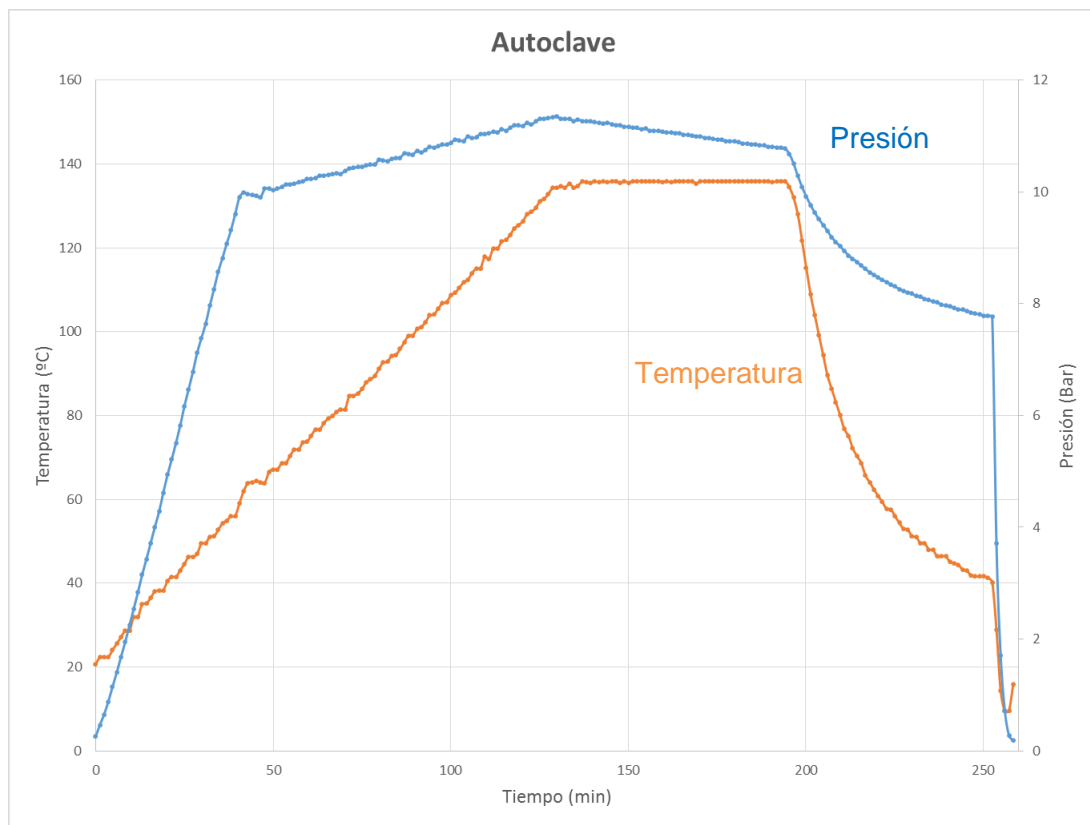


Figura 44: Ciclo utilizado para la fabricación de la viga de vidrio en el autoclave.

4.4.5 Resultado final

Finalmente el resultado de la viga antes de ser unida con el adhesivo es el mostrado en la Figura 45.



Figura 45: Resultado post-autoclave.

4.4.6 Unión con adhesivo

Una vez comprobado que los decalajes encajan adecuadamente (*Figura 46*), se procede a la colocación del adhesivo, dejando un tiempo de curado de 24 horas, obteniendo como resultado la unión de la *Figura 47*.

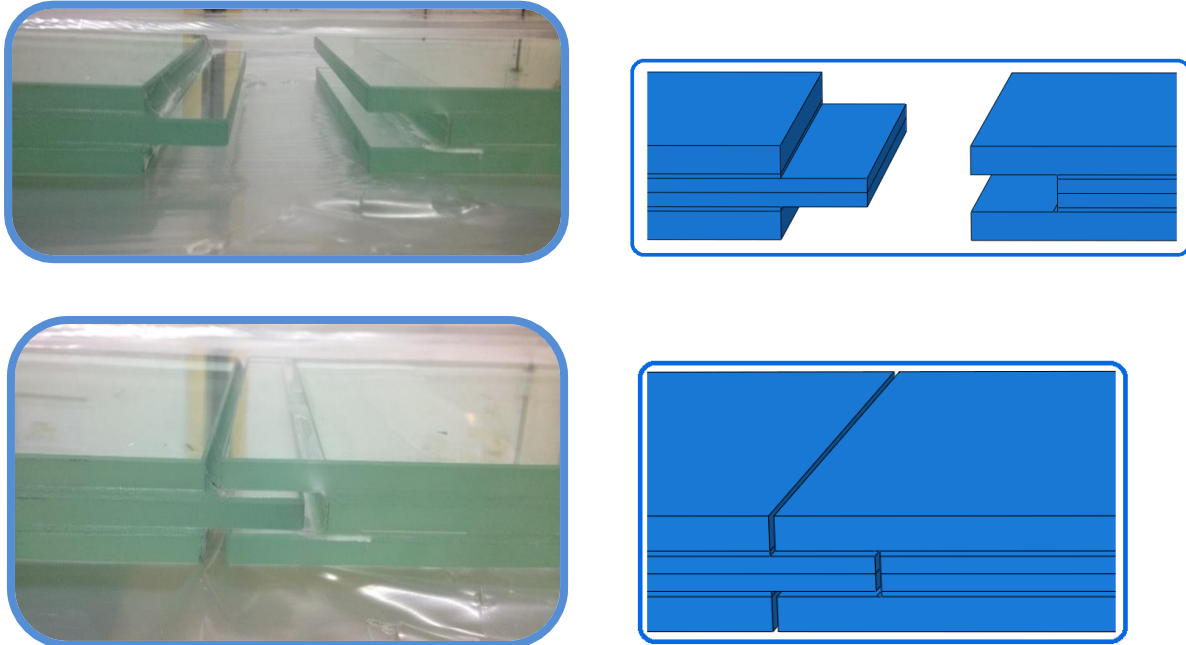


Figura 46: Colocación de las dos partes de la viga, comparación geometría simulada con fabricación.

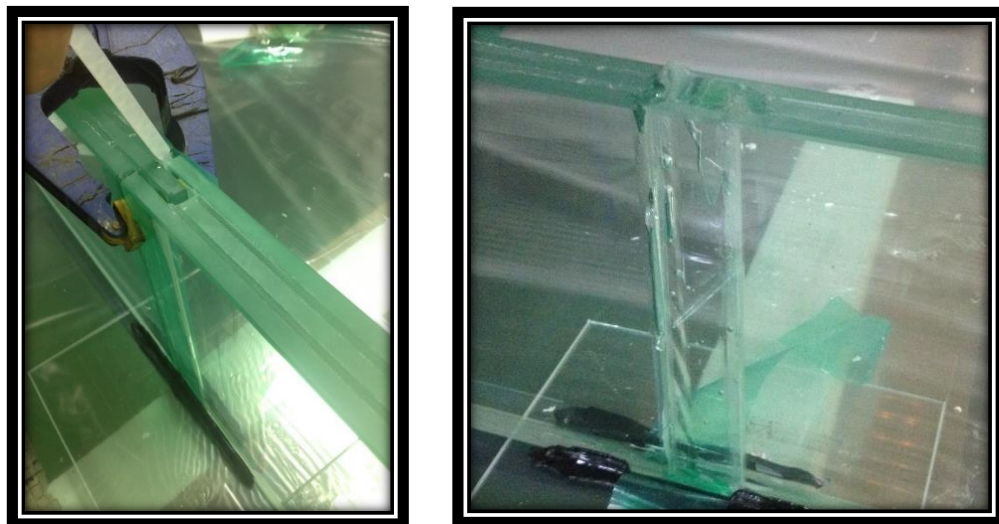


Figura 47: Unión mediante el adhesivo y resultado post - curado.

4.5 Ensayos y comparación con las simulaciones

Para la realización del ensayo se ha utilizado una estructura con una geometría acorde a las simulaciones realizadas. De tal forma que se ejerce la carga en dos puntos de la zona

inferior de la viga, quedando sostenida por dos apoyos situados en la zona superior de la misma (*Figura 48*).

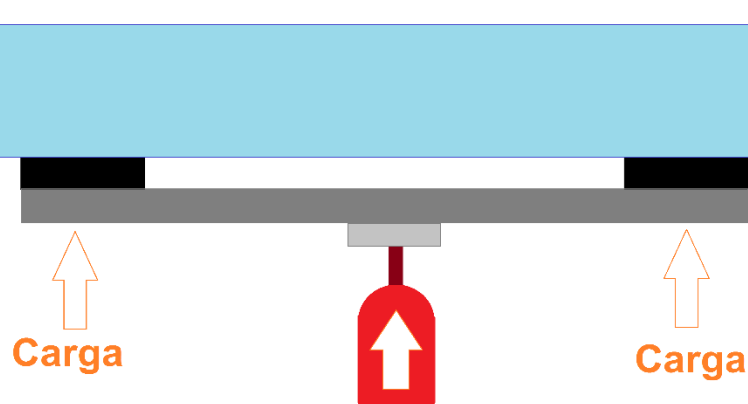
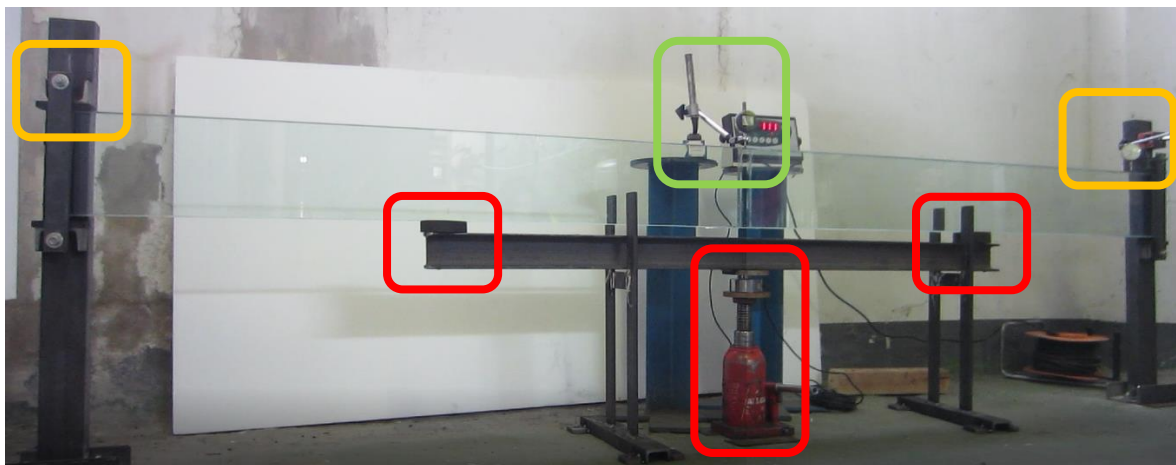


Figura 48: Esquema de la estructura utilizada para la realización del ensayo.

El ensayo se ha realizado utilizando los elementos mostrados en la *Figura 49*. En la zona inferior se ha colocado un gato con una célula de carga que permite medir la carga ejercida sobre la viga. Por otro lado, para medir la flecha máxima, se ha utilizado un reloj comparador situado en la zona superior de la viga.



Gato y célula de carga

Reloj comparador



Figura 49: Elementos utilizados para la realización del ensayo.

Para llevar a cabo el ensayo se ha introducido lentamente la carga, llegando a registrar la célula de carga 1382Kg y el reloj comparador 7.40mm (*Figura 50*), restando el peso del soporte de acero y el peso de la propia viga, la carga máxima soportada por la viga ha sido de 1271Kg.



Figura 50: Carga y flecha máxima registrada.

Comparando los resultados del ensayo con la simulación realizada para un decalaje de 30mm (*Figura 51*), se observa que los resultados de las simulaciones se asemejan a los del ensayo en gran medida. La carga soportada por la viga (12468N), es superior a los 8000N esperados, sin embargo, la primera grieta en la viga aparece con 7073N, la segunda grieta se da con 8515N y finalmente se produce la fractura de la viga con 12468N.

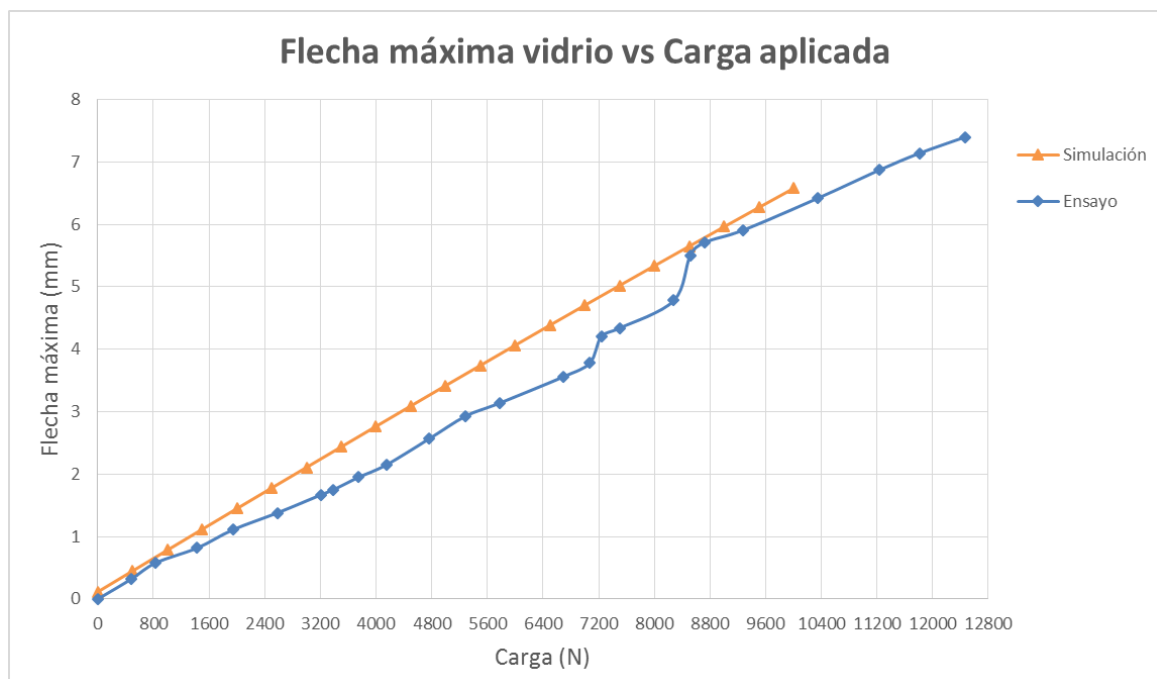


Figura 51: Comparativa de los resultados de la simulación con el ensayo.

Analizando la zona donde se ha producido la rotura de la viga, se observa que se produce en la lámina de vidrio situada en el centro, la cual sobresale del resto previamente a ser unida con la otra fracción de viga. Si se compara la zona donde las tensiones eran máximas en las simulaciones (zona roja en la *Figura 52*), con la zona donde se ha producido la rotura del vidrio (*Figura 52*), se observa que los resultados de las simulaciones se corresponden con los del ensayo.

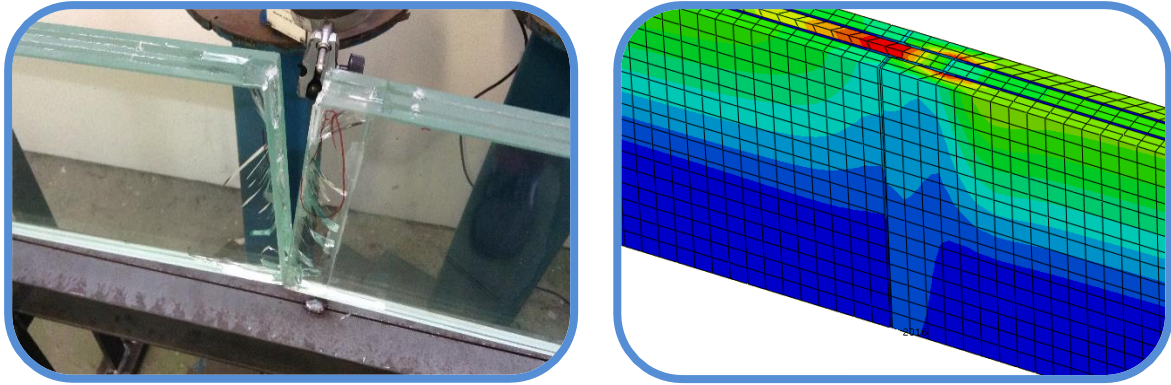


Figura 52: Comparativa de la zona de rotura de las simulaciones y el ensayo.

Si se analiza con más detalle la rotura (*Figura 53*), se ve que se produce a 50 mm de la zona superior, siendo una rotura frágil, tal y como se espera en un material tan frágil como es el vidrio.

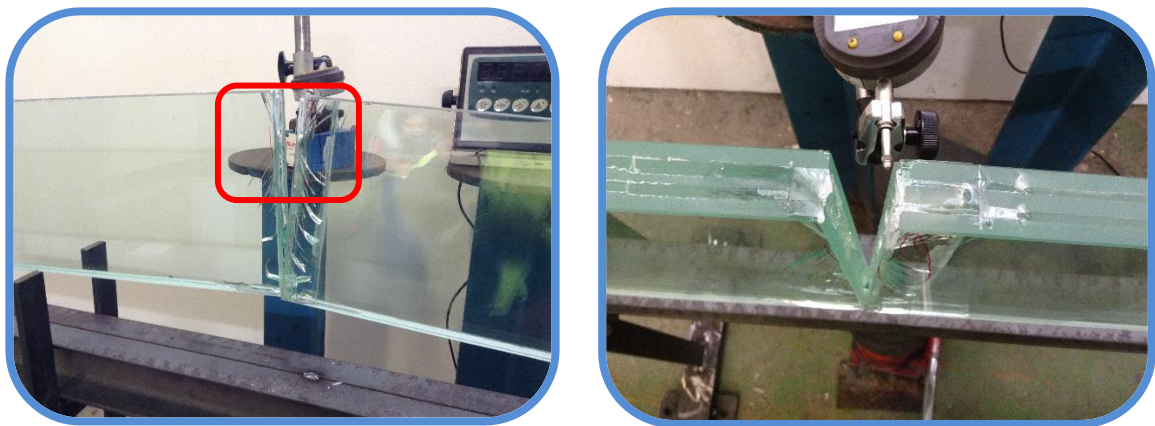


Figura 53: Detalle de la rotura.

5 Conclusiones y discusión

Atendiendo a las simulaciones realizadas se ha comprobado que, la utilización de láminas de vidrio unidas con SentryGlas® como sustitutivo a una viga de vidrio maciza es posible, ya que las propiedades mecánicas de la viga no se ven altamente afectadas. Además, también sería factible subdividir la viga en dos partes, uniéndolas mediante algún adhesivo especial, aunque en este caso las propiedades de la viga se verían afectadas, siendo el caso óptimo la unión con un decalaje de 30 mm. De cara a su utilización como elemento estructural habría que tener en cuenta las limitaciones que este tipo de material tiene. Por un lado la fragilidad de la viga para soportar posibles golpes, por otro que la carga soportada sería 10 veces menor que si la viga fuera de acero y también por el tipo de rotura del vidrio, ya que si se diera el caso la viga se derrumbaría.

Si nos centramos en el comportamiento del adhesivo se observa que es el correcto, ya que no se ve afectado hasta momentos posteriores a que la viga supere su límite de rotura. Por tanto, sería adecuado utilizar este tipo de adhesivos como método de unión. Por otro lado, la transparencia del adhesivo lo hace apto para este uso, ya que visualmente no es apreciable, permitiendo que la unión no sea visible.

Por último, de cara a la fabricación en serie de este tipo de vigas, habría que tener en cuenta que se debería realizar mediante un proceso de calandrado en vez de en bolsa de vacío, ya que este último es excesivamente laborioso. Además, a la hora de introducir el adhesivo entre las dos fracciones de vidrio, es imprescindible evitar la formación de burbujas en el interior ya que, de lo contrario, la carga soportada por la viga sería menor de lo esperado. Por otro lado, para mejorar estéticamente el acabado se podrían pulir los cantos con brillo, de esta forma la unión quedaría prácticamente imperceptible.

Comparando el ensayo con la simulación realizada, se ha visto como con el manejo de un programa de elementos finitos, se puede proceder a realizar una simulación de un ensayo de una viga de vidrio a cuatro puntos. Este método permite el estudio bajo diferentes condiciones, ahorrando tiempo y reduciendo costes frente a los métodos experimentales.

De cara a mejorar el diseño, se podría aumentar el grosor del vidrio central, ya que es el que más sufre, así como diseñar otras geometrías de unión entre vigas que minimicen las sobretensiones en los vidrios cerca de las zonas de unión.

6 Bibliografía

[1] Apuntes asignatura Deformación y fractura de materiales. Máster en Ingeniería Mecánica.

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2014

[2] TESIS DOCTORAL: Modelización de la respuesta de elementos estructurales lineales de vidrio plano: vigas y pilares pretensados.

Miguel Ángel Núñez Díaz.

Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 2015

[3] CEN/TC NORMA: prEn 16612. Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing.

Luxemburgo: European Commission.

[4] UNE-EN 12603:2003 - 2003-03-28. Vidrio para la edificación. Procedimientos para asegurar la bondad del ajuste y de los intervalos de confianza de los datos de resistencia del vidrio según la distribución de "Weibull".

Madrid, España: AENOR, Marzo 2003

[5] Physical properties of SentryGlas® and Butacite®.

Kuraray - www.sentryglas.com

[6] Adhesively bonded reinforced glass beams.

P.C. (Christian) Louter

HERON Vol. 52, Pag. 32-55 - 2007, Faculty of Architecture, Delft University of Technology, the Netherlands

[7] Performance of SentryGlas-laminated metal-reinforced glass beams at 23, -20 and 60°C.

Christian Louter, Freek Bos, Dieter Callewaert, Fred Veera

Proceedings of Glass Processing Days, 2009

[8] Experimental analysis on steel reinforced glass beams at different temperatures

Cruz and I. Valente, Carvalho, B. Marinho and S. Ribeiro

Conference on Structural Glass, 2013, University of Minho, Guimarães, Portugal

[9] Durability of SG-laminated reinforced glass beams

Christian Louter, Jan Belis, Fred Veer, Jean-Paul Lebet

Proceedings of Glass Processing Days, 2011

[10] Walking on air, designing and engineering a glass bridge

F.A.Veer, M. Bosma, P.M.J. van Swieten, P.C. Louter, T. Romein & Van Noordenne glas groep

Proceedings of Glass Processing Days, 2007

[12] Thinking Big with Structural Glass

James O'Callaghan BEng (Hons) CEng MStructE, Marcin Marchewka, MEng MRes Eckersley O'Callaghan

Proceedings of Glass Processing Days, 2009

[12] Structurally Efficient Glass Laminated Composite Beams

Dr. F.A.Veer, A.C. Riemsagel, C.N. Ting

Proceedings of Glass Processing Days, 2001, Delft University of Technology, the Netherlands

[13] Reinforced Glass Cantilever Beams

Louter, P.C. & Belis, J. & Bos, F.P. & Veer, F.A. & Hobbelman G.J

Proceedings of Glass Processing Days, 2005, Tampere, Finland

[14] Abaqus 6.12 Scripting User's Manual

[15] Abaqus 6.10 Scripting Reference Manual

7 Anexos

7.1 Ficha técnica del SentryGlas®

ELASTIC PROPERTIES OF SENTRYGLAS® SG5000 FOR STRUCTURAL CALCULATIONS

Data has been evaluated according to ASTM.

Young's Modulus E MPa (psi)		Load Duration						
		1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
Temperature	10 °C (50 °F)	692. (1.00 E+05)	681. (98745)	651. (94395)	597. (86565)	553. (80185)	499. (72355)	448. (64960)
	20 °C (68 °F)	628. (91060)	612. (88740)	567. (82215)	493. (71485)	428. (62060)	330. (47850)	256. (37120)
	24 °C (75 °F)	581. (84245)	561. (81345)	505. (73225)	416. (60320)	327. (47415)	217. (31465)	129. (18705)
	30 °C (86 °F)	442. (64090)	413. (59885)	324. (46980)	178. (25810)	148. (21460)	34.7 (5032)	15.9 (2306)
	40 °C (104 °F)	228. (33060)	187. (27115)	91.6 (13282)	27.8 (4031)	13.6 (1972)	9.86 (1430)	8.84 (1282)
	50 °C (122 °F)	108. (15660)	78.8 (11426)	33.8 (84901)	12.6 (1827)	8.45 (1225)	6.54 (948.3)	6.00 (870)
	60 °C (140 °F)	35.3 (5119)	24.5 (3553)	10.9 (1581)	5.10 (739.5)	3.87 (561.2)	3.24 (469.8)	2.91 (422)
	70 °C (158 °F)	11.3 (1639)	8.78 (1273)	5.64 (817.8)	2.52 (365.4)	1.77 (256.7)	1.44 (208.8)	1.35 (195.8)
	80 °C (176 °F)	4.65 (674.3)	3.96 (574.2)	2.49 (361.1)	0.96 (139.2)	0.75 (108.8)	0.63 (91.4)	0.54 (78.3)

Poisson Ratio, U		Load Duration						
		1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
Temperature	10 °C (50 °F)	0.442	0.443	0.446	0.450	0.454	0.458	0.463
	20 °C (68 °F)	0.448	0.449	0.446	0.459	0.464	0.473	0.479
	24 °C (75.2 °F)	0.452	0.453	0.458	0.465	0.473	0.482	0.489
	30 °C (86 °F)	0.463	0.466	0.473	0.485	0.488	0.497	0.499
	40 °C (104 °F)	0.481	0.484	0.492	0.498	0.499	0.499	0.499
	50 °C (122 °F)	0.491	0.493	0.497	0.499	0.499	0.500	0.500
	60 °C (140 °F)	0.497	0.498	0.499	0.500	0.500	0.500	0.500
	70 °C (158 °F)	0.499	0.499	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
	80 °C (176 °F)	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500

7.2 Ficha técnica del adhesivo Araldite 2028-01

HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

Advanced Materials

Material Testing

K-401.P.28 CH-4057 Basel

Tel.: ++41 61 299 22 56

PRÜFBERICHT



SCHWEIZERISCHER PRÜFSTELLENDIENST
SERVICE SUISSE D'ESSAI
SERVIZIO DI PROVA IN SVIZZERA
SWISS TESTING SERVICE

Akkreditierungs- Nr. STS 440

Prüfberichts-Nr.: 11008164

Zugversuch ISO 527-2/93

Prüfungsdatum : 02.11.2011
Auftraggeber : HOEFERLIN, A.
Adresse : K-403.2.42
Auftragsnummer : 11002261
Mag. -Nr. : 249825
Muster : ARALDITE 2028-1
Aushärtung : 16h40°C

Lagerung :
Mat.-Typ : GHU
Prüftemperatur : +23°C
Soak Time : 0
Pruefer : helfen
Bezugslänge L0 : 20 mm
Prüfkörper-Typ : PK-TYP 5A

Ergebnisse:

Legende	Nr	E _{mod} MPa	σ-S MPa	σ-Max MPa	σ-Bruch MPa	ε bei σ-S %	ε bei σ-Max %	ε bei σ-Bruch %	Dicke mm	Breite mm
	1	17.4	-	9.82	9.42	-	63.22	63.62	3.56	3.95
	2	18.9	-	13.50	13.5	-	67.06	67.12	3.70	3.95
	3	17.1	-	9.59	8.97	-	54.72	54.92	3.47	3.95
	4	18.4	-	11.02	10.8	-	56.37	56.58	3.51	3.94
	5	→12.3	-	13.34	12.7	-	70.73	70.87	3.53	3.95

Statistik:

Serie	E _{mod} MPa	σ-S MPa	σ-Max MPa	σ-Bruch MPa	ε bei σ-S %	ε bei σ-Max %	ε bei σ-Bruch %	Dicke mm	Breite mm
n = 4									
x	18.0	-	10.98	10.7	-	60.34	60.56	3.56	3.95
s	0.8	-	1.79	2.03	-	5.80	5.78	0.10	0.01
v	4.53	-	16.32	19.08	-	9.61	9.54	2.76	0.16

Bemerkung

2

Beilage : Geprüfte Proben

Prüfgeschwindigkeit Pk 1 : 1.00 mm/min

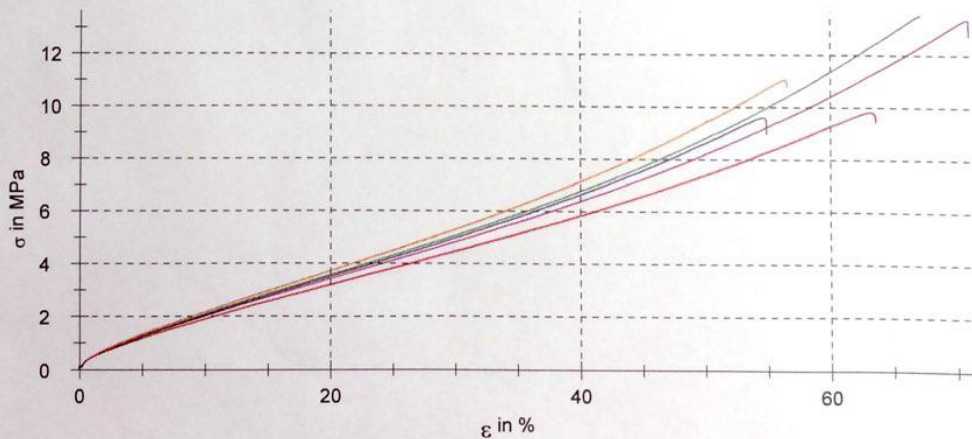
Prüfgeschwindigkeit : 5.00 mm/min

Geschwindigkeit E- Modul : 1.0 mm/min

Messplatz-Nr. : 2001

Visum :

gu



7.3 Densidad de energía del modelo neo-Hookeano

La función de densidad de energía de deformación (U) de un material es una función escalar que relaciona la energía almacenada del material con la deformación. Para un material isótropo puede expresarse en términos de los alargamientos principales (λ_i), o en función de los invariantes de deformación (I_i).

$$U = \hat{U}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \tilde{U}(I_1, I_2, I_3)$$

Para definir la función de densidad de energía de deformación de un material hiperelástico isótropo, existen distintos modelos. Los modelos más utilizados son los de Arruda-Boyce, Marlow, Mooney-Rivlin y neo-Hookeano, y se expresan en función de distintos parámetros.

Para el modelo neo-Hookeano la forma de definir la densidad de energía es la siguiente:

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2$$

Donde U es la energía de deformación por unidad de volumen, C_{10} y D_1 son parámetros del material dependientes de la temperatura y \bar{I}_1 es el primer invariante de deformación definido como $\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$, J^{el} es el jacobiano de la transformación. El módulo de rigidez (G) y el módulo de compresibilidad (κ) quedan definidos como $G = 2C_{10}$ y $\kappa = 2/D_1$.

7.4 Código del programa parametrizado

Las siguientes variables están parametrizadas en función de la simulación de la viga.

```
#####  
#Definir propiedades:  
#Unidades: Todo en milímetros y Newtons. E en (N/mm2) = (MPa).  
#Viga  
Lv = 3000  
Hv=200  
#Vidrio  
EspesorVidrio=10  
Decalaje=30  
EVidrio= 70000  
VVidrio= 0.22  
#Lámina  
EspesorLamina=1.52  
ELamina= 493  
VLamina= 0.459  
C10= ELamina/((1+ VLamina)*4)  
D1=(6*(1-2*VLamina))/(ELamina)  
#Adhesivo  
EAdhesivo=18  
VAdhesivo= 0.239  
EspesorAdhesivo=1.52  
C10_A= EAdhesivo/((1+ VAdhesivo)*4)  
D1_A=(6*(1-2* VAdhesivo))/( EAdhesivo)  
#Apoyos  
Ra = 100  
Aa = 60  
Ea = 1000000000  
Va= 0.3  
SeparacionInicial= 0.5  
DistanciaOrigen=750  
Carga=-2500  
#####  
  
from abaqus import *  
from abaqusConstants import *  
backwardCompatibility.setValues(includeDeprecated=True, reportDeprecated=False)  
myModel = mdb.Model(name='ModeloAbaqus')  
  
# Damos la geometría a la viga definiéndolo como un rectángulo  
import part  
mySketch1 = myModel.ConstrainedSketch(name='Viga', sheetSize=100000.)
```

```
mySketch1.rectangle(point1=(0,0), point2=( Lv,Hv))
```

Definimos extrusión y lo generamos

```
Viga = myModel.Part(dimensionality=THREE_D, name='Viga',  
type=DEFORMABLE_BODY)  
myModel.parts['Viga'].BaseSolidExtrude(sketch=mySketch1,depth=3*EspesorVidrio+2*Es  
pesorLamina)
```

#Definimos 4 apoyos con la posición que tendrán en el Assembly

Damos la geometría a los apoyos definiéndolos como círculos

```
mySketch2 = myModel.ConstrainedSketch(name='Apoyo1', sheetSize=100000.)  
mySketch2.CircleByCenterPerimeter(center=(Ra,-Ra),point1=(0,-Ra))
```

Definimos extrusión y los generamos

```
Apoyo1 = myModel.Part(dimensionality= THREE_D, name='Apoyo1',  
type=DEFORMABLE_BODY)  
myModel.parts['Apoyo1'].BaseSolidExtrude (sketch=mySketch2, depth=Aa)
```

Damos la geometría a los apoyos definiéndolos como círculos

```
mySketch3 = myModel.ConstrainedSketch(name='Apoyo2', sheetSize=100000.)  
mySketch3.CircleByCenterPerimeter(center=(Lv-Ra,-Ra),point1=(Lv,-Ra))
```

Definimos extrusión y los generamos

```
Apoyo2 = myModel.Part(dimensionality= THREE_D, name='Apoyo2',  
type=DEFORMABLE_BODY)  
myModel.parts['Apoyo2'].BaseSolidExtrude (sketch=mySketch3, depth=Aa)
```

Damos la geometría a los apoyos definiéndolos como círculos

```
mySketch4 = myModel.ConstrainedSketch(name='Apoyo3', sheetSize=100000.)  
mySketch4.CircleByCenterPerimeter(center=(DistanciaOrigen,(Hv+Ra+SeparacionInicial)  
,point1=( DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial))
```

Definimos extrusión y los generamos

```
Apoyo3 = myModel.Part(dimensionality= THREE_D, name='Apoyo3',  
type=DEFORMABLE_BODY)  
myModel.parts['Apoyo3'].BaseSolidExtrude (sketch=mySketch4, depth=Aa)
```

Damos la geometría a los apoyos definiéndolos como círculos

```
mySketch5 = myModel.ConstrainedSketch(name='Apoyo4', sheetSize=100000.)  
mySketch5.CircleByCenterPerimeter(center=(Lv-  
DistanciaOrigen,(Hv+Ra+SeparacionInicial)),point1=( Lv-  
DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial))
```

Definimos extrusión y los generamos

```
Apoyo4 = myModel.Part(dimensionality= THREE_D, name='Apoyo4',  
type=DEFORMABLE_BODY)  
myModel.parts['Apoyo4'].BaseSolidExtrude (sketch=mySketch5, depth=Aa)
```

Creamos el material del Vidrio

```
import material  
myMaterialVidrio = myModel.Material(name='M-Vidrio')
```

Propiedades del material del Vidrio

```
elasticProperties = (Evidrio, VVidrio)
```



```
myMaterialVidrio.Elastic(table=(elasticProperties, ) )
```

Creamos el material de los apoyos

```
import material  
myMaterialRigido = myModel.Material(name='M-Rigido')
```

Propiedades del material de los apoyos

```
elasticProperties = (Ea, Va)  
myMaterialRigido.Elastic(table=(elasticProperties, ) )
```

Creamos el material de la lámina

```
import material  
myMaterialLamina = myModel.Material(name='M-Lamina')
```

Propiedades del material de la lámina

```
hyperelasticProperties = (C10, D1)  
myMaterialLamina.Hyperelastic(testData=OFF, table=(hyperelasticProperties,),  
type=NEO_HOOKE )
```

Creamos el material del adhesivo

```
import material  
myMaterialAdhesivo = myModel.Material(name='M-Adhesivo')
```

Propiedades del material del adhesivo

```
hyperelasticProperties_A = (C10_A, D1_A)  
myMaterialAdhesivo.Hyperelastic(testData=OFF,  
table=(hyperelasticProperties_A,),type=NEO_HOOKE )
```

Creamos las secciones

```
import section  
mySection1 = myModel.HomogeneousSolidSection(name='SeccionVidrio',  
material='M-Vidrio', thickness=None )  
mySection2 = myModel.HomogeneousSolidSection(name='SeccionLamina',  
material='M-Lamina', thickness=None)  
mySection3 = myModel.HomogeneousSolidSection(name='SeccionRigido',  
material='M-Rigido', thickness=None)  
mySection4 = myModel.HomogeneousSolidSection(name='SeccionAdhesivo',  
material='M-Adhesivo', thickness=None)
```

Creamos las particiones para subdividir la viga en vidrios y Sentryglass

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Viga.cell  
s,point1=(0,0,EspesorVidrio),point2=(0,Lv,EspesorVidrio),point3=(Hv,Lv,EspesorVidrio))  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Viga.cell  
s,point1=(0,0,EspesorVidrio+EspesorLamina),point2=(0,Lv,EspesorVidrio+EspesorLamina)  
,point3=(Hv,Lv,EspesorVidrio+EspesorLamina))  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Viga.cell  
s,point1=(0,0,2*EspesorVidrio+EspesorLamina),point2=(0,Lv,2*EspesorVidrio+EspesorLa  
mina),point3=(Hv,Lv,2*EspesorVidrio+EspesorLamina))  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Viga.cell  
s,point1=(0,0,2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point2=(0,Lv,2*EspesorVidrio+2*Espeso  
rLamina),point3=(Hv,Lv,2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina))
```

Creamos las particiones para establecer las BC

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Viga.cell  
s,point1=(0,0,(3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2),point2=(0,Lv,(3*EspesorVidrio+2*Esp  
esorLamina)/2),point3=(Hv,Lv,(3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2))
```

```
CaraCentro=(Lv/2,Hv/2,((3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2))
```

```
caraC = Viga.faces.findAt(CaraCentro)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionFaceByShortestPath(faces=caraC,poin  
t1=(Lv/2,0,((3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2)),point2=(Lv/2,Hv,((3*EspesorVidrio+2*  
EspesorLamina)/2)))
```

```
EjeCentro=(Lv/2,Hv/2,((3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2))
```

```
EjeC = Viga.edges.findAt(EjeCentro)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionEdgeByPoint(edge=EjeC,point=(Lv/2,H  
v/2,((3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2)))
```

Creamos las particiones para subdividir la viga en dos partes unidas con Adhesivo

```
CaraS1=(Lv/2,Hv,EspesorVidrio/2)
```

```
caraS11 = Viga.cells.findAt(CaraS1)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS11  
,point1=(Lv/2,0,0),point2=(Lv/2,0,EspesorVidrio),point3=(Lv/2,Hv, EspesorVidrio))
```

```
CaraS2=(Lv/1.9,Hv,EspesorVidrio/2)
```

```
caraS22 = Viga.cells.findAt(CaraS2)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS22  
,point1=(Lv/2+EspesorAdhesivo,0,0),point2=(Lv/2+EspesorAdhesivo,0,EspesorVidrio),point  
3=(Lv/2+EspesorAdhesivo,Hv, EspesorVidrio))
```

```
CaraS3=(Lv/2,Hv,EspesorVidrio+(EspesorLamina/2))
```

```
caraS33 = Viga.cells.findAt(CaraS3)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS33  
,point1=(Lv/2,0,EspesorVidrio),point2=(Lv/2,0,EspesorVidrio+EspesorLamina),point3=(Lv/2,  
Hv, EspesorVidrio+EspesorLamina))
```

```
CaraS4=(Lv/2,Hv,(2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)+EspesorVidrio/2)
```

```
caraS44 = Viga.cells.findAt(CaraS4)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS44  
,point1=(Lv/2,0, 2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point2=(Lv/2,0,  
3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point3=(Lv/2,Hv, 3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina))
```

```
CaraS5=(Lv/1.9,Hv,(2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)+EspesorVidrio/2)
```

```
caraS55 = Viga.cells.findAt(CaraS5)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS55  
, point1=(Lv/2+EspesorAdhesivo,0,  
2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point2=(Lv/2+EspesorAdhesivo,0,  
3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point3=(Lv/2+EspesorAdhesivo,Hv,  
3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina))
```

```
CaraS6=(Lv/2,Hv,2*EspesorVidrio+EspesorLamina+(EspesorLamina/2))
```

```
caraS66= Viga.cells.findAt(CaraS6)
```

```
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS66,point1=(Lv/2,0,2*EspesorVidrio+EspesorLamina),point2=(Lv/2,0,2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point3=(Lv/2,Hv, 2*EspesorVidrio +2*EspesorLamina))
```

```
CaraS7=(Lv/2+Decalaje,Hv,EspesorVidrio+(EspesorLamina/2))  
caraS77 = Viga.cells.findAt(CaraS7)  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS77,point1=(Lv/2+Decalaje,0,EspesorVidrio),point2=(Lv/2+Decalaje,0,EspesorVidrio+EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje,Hv, EspesorVidrio+EspesorLamina))
```

```
CaraS8=(Lv/2+Decalaje,Hv,2*EspesorVidrio+EspesorLamina+(EspesorLamina/2))  
caraS88= Viga.cells.findAt(CaraS8)  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS88,point1=(Lv/2+Decalaje,0,2*EspesorVidrio+EspesorLamina),point2=(Lv/2+Decalaje,0,2*EspesorVidrio +2*EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje,Hv, 2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina))
```

```
CaraS9=(Lv/1.9+Decalaje,Hv,EspesorVidrio+(EspesorLamina/2))  
caraS99 = Viga.cells.findAt(CaraS9)  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS99,point1=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,EspesorVidrio),point2=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,EspesorVidrio+EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,Hv, EspesorVidrio+EspesorLamina))
```

```
CaraS10=(Lv/1.9+Decalaje,Hv,2*EspesorVidrio+EspesorLamina+(EspesorLamina/2))  
caraS100= Viga.cells.findAt(CaraS10)  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS100,point1=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,2*EspesorVidrio+EspesorLamina),point2=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,Hv, 2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina))
```

```
CaraS77=(Lv/2+Decalaje,Hv,EspesorVidrio+EspesorLamina+(EspesorVidrio/2))  
caraS777 = Viga.cells.findAt(CaraS77)  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS777,point1=(Lv/2+Decalaje,0,EspesorVidrio),point2=(Lv/2+Decalaje,0,EspesorVidrio+EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje,Hv, EspesorVidrio+EspesorLamina))
```

```
CaraS88=(Lv/2+Decalaje,Hv,EspesorVidrio+EspesorLamina+(EspesorVidrio/1.9))  
caraS888= Viga.cells.findAt(CaraS88)  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS888,point1=(Lv/2+Decalaje,0,2*EspesorVidrio+EspesorLamina),point2=(Lv/2+Decalaje,0,2*EspesorVidrio +2*EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje,Hv, 2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina))
```

```
CaraS99=(Lv/1.9+Decalaje,Hv,EspesorVidrio+EspesorLamina+(EspesorVidrio/2))  
caraS999 = Viga.cells.findAt(CaraS99)  
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS999,point1=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,EspesorVidrio),point2=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,EspesorVidrio+EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,Hv, EspesorVidrio+EspesorLamina))
```

```
CaraS100=(Lv/1.9+Decalaje,Hv,EspesorVidrio+EspesorLamina+(EspesorVidrio/1.9))
```

```

caraS1000= Viga.cells.findAt(CaraS100)
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Viga'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=caraS1000,point1=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,2*EspesorVidrio+EspesorLamina),point2=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,0,2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina),point3=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo,Hv, 2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina))

```

Creamos las particiones para subdividir los apoyos para asegurar contacto.

#Apoyo1

```

mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo1'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo1.cells,point1=(0,-Ra,0),point2=(2*Ra,-Ra,0),point3=(2*Ra,-Ra,Aa))
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo1'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo1.cells,point1=(Ra,-2*Ra,0),point2=(Ra,0,0),point3=(Ra,0,Aa))

```

#Apoyo2

```

mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo2'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo2.cells,point1=(0,-Ra,0),point2=(2*Ra,-Ra,0),point3=(2*Ra,-Ra,Aa))
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo2'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo2.cells,point1=(-Ra+Lv,-2*Ra,0),point2=(-Ra+Lv,0,0),point3=(-Ra+Lv,0,Aa))

```

#Apoyo3

```

mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo3'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo3.cells,point1=(0,Ra+Hv+SeparacionInicial,0),point2=(2*Ra,Ra+Hv+SeparacionInicial,0),point3=(2*Ra,Ra+Hv+SeparacionInicial,Aa))
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo3'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo3.cells,point1=(DistanciaOrigen,-2*Ra,0),point2=(DistanciaOrigen,0,0),point3=(DistanciaOrigen,0,Aa))

```

#Apoyo4

```

mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo4'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo4.cells,point1=(0,Ra+Hv+SeparacionInicial,0),point2=(2*Ra,Ra+Hv+SeparacionInicial,0),point3=(2*Ra,Ra+Hv+SeparacionInicial,Aa))
mdb.models['ModeloAbaqus'].parts['Apoyo4'].PartitionCellByPlaneThreePoints(cells=Apoyo4.cells,point1=(Lv-DistanciaOrigen,-2*Ra,0),point2=(Lv-DistanciaOrigen,0,0),point3=(Lv-DistanciaOrigen,0,Aa))

```

Asignamos las secciones a los apoyos y a las particiones

```

region1= (Apoyo1.cells,)
Apoyo1.SectionAssignment(region=region1, sectionName='SeccionRigido')

```

```

region2 = (Apoyo2.cells,)
Apoyo2.SectionAssignment(region=region2, sectionName='SeccionRigido')

```

```

region3 = (Apoyo3.cells,)
Apoyo3.SectionAssignment(region=region3, sectionName='SeccionRigido')

```

```

region4 = (Apoyo4.cells,)
Apoyo4.SectionAssignment(region=region4, sectionName='SeccionRigido')

```

```

Viga.SectionAssignment(region=(caraS11,), sectionName='SeccionAdhesivo')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS22,), sectionName='SeccionVidrio')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS33,), sectionName='SeccionAdhesivo')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS44,), sectionName='SeccionLamina')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS55,), sectionName='SeccionAdhesivo')

```

```
Viga.SectionAssignment(region=(caraS77,), sectionName='SeccionVidrio')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS88,), sectionName='SeccionLamina')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS100,), sectionName='SeccionVidrio')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS777,), sectionName='SeccionVidrio')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS888,), sectionName='SeccionAdhesivo')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS999,), sectionName='SeccionLamina')
Viga.SectionAssignment(region=(caraS1000,), sectionName='SeccionAdhesivo')
```

```
CaraS1=(0,0,0)
caraS1= Viga.cells.findAt(CaraS1)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS1,), sectionName='SeccionVidrio')
```

```
CaraS2=(0,0,EspesorVidrio+(EspesorLamina/2))
caraS2= Viga.cells.findAt(CaraS2)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS2,), sectionName='SeccionLamina')
```

```
CaraS3=(0,0,EspesorVidrio+EspesorLamina+EspesorVidrio/1.9)
caraS3= Viga.cells.findAt(CaraS3)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS3,), sectionName='SeccionVidrio')
```

```
CaraS4=(Lv,0,EspesorVidrio+EspesorLamina+EspesorVidrio/2.1)
caraS4= Viga.cells.findAt(CaraS4)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS4,), sectionName='SeccionVidrio')
```

```
CaraS5=(Lv,0,3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)
caraS5= Viga.cells.findAt(CaraS5)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS5,), sectionName='SeccionVidrio')
```

```
CaraS6=(Lv/2+EspesorAdhesivo/2,0,0)
caraS6= Viga.cells.findAt(CaraS6)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS6,), sectionName='SeccionAdhesivo')
```

```
CaraS7=(Lv/2+EspesorAdhesivo/2,0, 3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)
caraS7= Viga.cells.findAt(CaraS7)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS7,), sectionName='SeccionAdhesivo')
```

```
CaraS8=(Lv/2+Decalaje+EspesorAdhesivo/2,0,
EspesorVidrio+EspesorLamina+EspesorVidrio/1.9)
caraS8= Viga.cells.findAt(CaraS8)
Viga.SectionAssignment(region=(caraS8,), sectionName='SeccionAdhesivo')
```

Creamos el ensamblaje

```
import assembly
```

```
myAssembly1 = myModel.rootAssembly
myInstance1 = myAssembly1.Instance(name='I-Apoyo1', part= Apoyo1, dependent=ON)
myAssembly1.translate(instanceList=['I-Apoyo1'],vector=(0.0,0.0,-Aa/4))
```

```
myAssembly2=myModel.rootAssembly
myInstance2 = myAssembly2.Instance(name='I-Apoyo2', part=Apoyo2,dependent=ON)
myAssembly2.translate(instanceList=['I-Apoyo2'],vector=(0.0,0.0,-Aa/4))
```

```
myAssembly3=myModel.rootAssembly
myInstance3 = myAssembly3.Instance(name='I-Apoyo3', part=Apoyo3,dependent=ON)
myAssembly3.translate(instanceList=['I-Apoyo3'],vector=(0.0,0.0,-Aa/4))
```

```

myAssembly4=myModel.rootAssembly
myInstance4 = myAssembly4.Instance(name='I-Apoyo4', part=Apoyo4,dependent=ON)
myAssembly4.translate(instanceList=['I-Apoyo4'],vector=(0.0,0.0,-Aa/4))

```

```

myAssembly5 = myModel.rootAssembly
myInstance5 = myAssembly5.Instance(name='I-Viga', part=Viga, dependent=ON)

```

Generamos el mallado

```

import mesh
elemType1set = mesh.ElemType(elemCode= C3D8, elemLibrary=STANDARD)
elemType1=(elemType1set,)
Apoyo1.seedPart( size=10)
r1= (Apoyo1.cells,)
Apoyo1.setElementType(regions=r1, elemTypes=elemType1)
Apoyo1.generateMesh()
Apoyo2.seedPart( size=10)
r2= (Apoyo2.cells,)
Apoyo2.setElementType(regions=r2, elemTypes=elemType1)
Apoyo2.generateMesh()
Apoyo3.seedPart( size=10)
r3= (Apoyo3.cells,)
Apoyo3.setElementType(regions=r3, elemTypes=elemType1)
Apoyo3.generateMesh()
Apoyo4.seedPart( size=10)
r4= (Apoyo4.cells,)
Apoyo4.setElementType(regions=r4, elemTypes=elemType1)
Apoyo4.generateMesh()

region1 = Viga.edges.findAt((0,Hv,EspesorVidrio/2,))
Div=(region1,)
Viga.seedEdgeByNumber(edges=Div , number=2)

region2 = Viga.edges.findAt((Lv,Hv,EspesorVidrio/2,))
Div=(region2,)
Viga.seedEdgeByNumber(edges=Div , number=2)

region1 = Viga.edges.findAt((0,Hv,EspesorVidrio/2+2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina,))
Div=(region1,)
Viga.seedEdgeByNumber(edges=Div , number=2)

region2 =
Viga.edges.findAt((Lv,Hv,EspesorVidrio/2+2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina,))
Div=(region2,)
Viga.seedEdgeByNumber(edges=Div , number=2)

elemType2set = mesh.ElemType(elemCode= C3D8, elemLibrary=STANDARD)
elemType2=(elemType2set,)
Viga.seedPart( size=14)
r5 = (Viga.cells,)
Viga.setElementType(regions=r5, elemTypes=elemType2)
Viga.generateMesh()

```


Creamos Step

```
myModel.StaticStep(name='Contacto', previous='Initial', timePeriod=1, initialInc=0.2,
description='BoundaryConditions',nlgeom=ON, minInc=0.00000000001, maxInc=0.2)
```

```
myModel.StaticStep(name='BC', previous='Contacto', timePeriod=10, initialInc=0.5,
description='BoundaryConditions',nlgeom=ON, minInc=0.00000000001, maxInc=0.5)
```

Condiciones de Contorno:

#Contacto

#Desplazamiento de Separacion Inicial

```
set10=myInstance1.faces.findAt((Ra,0, Aa/2,))
```

```
r10=(set10,)
```

```
myModel.DisplacementBC(name='ContactoApoyo1',createStepName='Contacto', region
=r10, u1=0, u2=0.1, u3=0 ,distributionType=UNIFORM)
```

```
set20=myInstance2.faces.findAt((Lv-Ra,0, Aa/2,))
```

```
r20=(set20,)
```

```
myModel.DisplacementBC(name='ContactoApoyo2',createStepName='Contacto', region
=r20, u1=0, u2=0.1, u3=0 ,distributionType=UNIFORM)
```

```
set30=myInstance3.faces.findAt((DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial, Aa/2,))
```

```
r30=(set30,)
```

```
myModel.DisplacementBC(name='ContactoApoyo3',createStepName='Contacto', region
=r30, u1=0, u2=-(SeparacionInicial+0.1), u3=0 ,distributionType=UNIFORM,)
```

```
set40=myInstance4.faces.findAt((Lv-DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial, Aa/2,))
```

```
r40=(set40,)
```

```
myModel.DisplacementBC(name='ContactoApoyo4',createStepName='Contacto', region
=r40, u1=0, u2=-(SeparacionInicial+0.1), u3=0 ,distributionType=UNIFORM)
```

#Fijación Inicial

```
set50=myInstance5.faces.findAt((0,Hv/2, 2*EspesorVidrio+EspesorLamina,))
```

```
r50=(set50,)
```

```
myModel.EncastreBC(name='FijacionIzq',createStepName='Contacto', region =r50)
```

```
set60=myInstance5.faces.findAt((Lv,Hv/2, 2*EspesorVidrio+EspesorLamina,))
```

```
r60=(set60,)
```

```
myModel.EncastreBC(name='FijacionDch',createStepName='Contacto', region =r60)
```

Carga en los Apoyos

```
set30=myInstance3.vertices.findAt((DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial+2*Ra, -Aa/4,))
```

```
r30=(set30,)
```

```
myModel.ConcentratedForce(name='Carga1',createStepName='BC', region =r30, cf1=0,
cf2=Carga, cf3=0 ,distributionType=UNIFORM)
```

```
set33=myInstance3.vertices.findAt((DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial+2*Ra,
3*Aa/4,))
```

```
r33=(set33,)
```

```
myModel.ConcentratedForce(name='Carga2',createStepName='BC', region =r33, cf1=0,
cf2=Carga, cf3=0 ,distributionType=UNIFORM)
```

Fijación Viga

```
set1=myInstance5.edges.findAt((Lv/2,Hv/8,((3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2)))
r1=( set1,)
myModel.DisplacementBC(name='FijacionBarra1',createStepName='BC', region =r1, u1=
UNSET, u2= UNSET, u3=0 ,distributionType=UNIFORM)
set2=myInstance5.edges.findAt((Lv/2,Hv/1.1,((3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2)))
r2=( set2,)
myModel.DisplacementBC(name='FijacionBarra2',createStepName='BC', region =r2, u1=
UNSET, u2= UNSET, u3=0 ,distributionType=UNIFORM)
set3=myInstance5.vertices.findAt((Lv/2,Hv/2,((3*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)/2)))
r3=( set3,)
myModel.DisplacementBC(name='FijacionBarra3',createStepName='BC', region =r3,
u1=0, u2= UNSET, u3= UNSET ,distributionType=UNIFORM)
```

Definimos la interacción entre los apoyos y la viga

```
import interaction
```

```
myModel.ContactProperty('IntProp1')
myModel.interactionProperties['IntProp1'].TangentialBehavior(formulation=FRICITIONLES
S)
```

```
i = mdb.models['ModeloAbaqus'].rootAssembly
e1 = i.instances['I-Apoyo1'].faces
region100 = i.Surface(name='SuperficieApoyo1', side1Faces=e1.findAt(((Ra,0,Aa/2), ),
((2*Ra,Ra,Aa/2), ) ))
```

```
i = mdb.models['ModeloAbaqus'].rootAssembly
e2 = i.instances['I-Apoyo2'].faces
region400 = i.Surface(name='SuperficieApoyo2', side1Faces=e2.findAt(((Lv-Ra,0,Aa/2), ),
))
```

```
i = mdb.models['ModeloAbaqus'].rootAssembly
e3= i.instances['I-Apoyo3'].faces
region200 = i.Surface(name='SuperficieApoyo3',
side1Faces=e3.findAt(((DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial,Aa/2), ), ))
```

```
i = mdb.models['ModeloAbaqus'].rootAssembly
e4 = i.instances['I-Apoyo4'].faces
region300 = i.Surface(name='SuperficieApoyo4', side1Faces=e4.findAt(((Lv-
DistanciaOrigen,Hv+SeparacionInicial,Aa/2), ), ))
```

#Cara Superior e Inferior

```
m = mdb.models['ModeloAbaqus'].rootAssembly
e5 = m.instances['I-Viga'].faces
region500 = m.Surface(name='SuperficieViga', side1Faces=e5.findAt(((Lv/2, Hv,
(EspesorVidrio)/2), ),(( Lv/2, Hv, EspesorVidrio+EspesorLamina/2), ),(( Lv/2,Hv,
(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/3), ),((
Lv/2,Hv,(2*EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorLamina/2), ), ((
Lv/2,Hv,(2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)+EspesorVidrio/2),), ((
Lv/2,Hv,(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/1.5),), ((Lv/2, 0,
(EspesorVidrio)/2), ),(( Lv/2, 0, EspesorVidrio+EspesorLamina/2), ),(( Lv/2,0,
(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/3), ),((
Lv/2,0,(2*EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorLamina/2), ), ((
Lv/2,0,(2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)+EspesorVidrio/2),), ((
```

```

Lv/2,0,(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/1.5),),((Lv/1.5, Hv,
(EspesorVidrio)/2), ),(( Lv/1.5, Hv, EspesorVidrio+EspesorLamina/2), ),(( Lv/1.5,Hv,
(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/3), ),((
Lv/1.5,Hv,(2*EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorLamina/2), ), ((
Lv/1.5,Hv,(2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)+EspesorVidrio/2),), ((
Lv/1.5,Hv,(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/1.5),), ((Lv/1.5, 0,
(EspesorVidrio)/2), ),(( Lv/1.5, 0, EspesorVidrio+EspesorLamina/2), ),(( Lv/1.5,0,
(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/3), ),((
Lv/1.5,0,(2*EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorLamina/2), ), ((
Lv/1.5,0,(2*EspesorVidrio+2*EspesorLamina)+EspesorVidrio/2),), ((
Lv/1.5,0,(EspesorVidrio+EspesorLamina)+EspesorVidrio/1.5),,) ))

```

```

myModel.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Interacción2' , createStepName='Initial',
master= region200 , slave = region500, sliding=FINITE, interactionProperty = 'IntProp1')
myModel.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Interacción3' , createStepName='Initial',
master= region300 , slave = region500, sliding=FINITE, interactionProperty = 'IntProp1')

```

```

myModel.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Interacción1' , createStepName='Initial',
master= region100 , slave = region500, sliding=FINITE, interactionProperty = 'IntProp1')
myModel.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Interacción4' , createStepName='Initial',
master= region400 , slave = region500, sliding=FINITE, interactionProperty = 'IntProp1')

```

Submit

```

import job
jobName = 'Modelo'
myJob = mdb.Job(name=jobName, model='ModeloAbaqus', description='_')
myJob.submit()
myJob.waitForCompletion()

```

